

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektroenergetiky

Energetické a ekonomické aspekty obnovitelných zdrojů elektrické energie

-

Electric Power and Economical Aspects of Renewable Sources of Electric Energy

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jindřich Stuchlý**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: Energetické a ekonomické aspekty obnovitelných zdrojů elektrické energie
Electric Power and Economical Aspects of Renewable Sources of Electric Energy

Zásady pro vypracování:

1. Popis hybridních systémů a výhody použití
2. Popis hybridního systému na VŠB - TUO
3. Analýza energetického potenciálu hybridních systémů

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] KAMINSKÝ, J.; VRTEK, M. Obnovitelné a alternativní zdroje energie. Ostrava, 2002
- [2] Copyright 2008 CEZ, a. s. Informace o vetrné energetice. [cit. 2008-5-19]. <http://www.cez.cz/cs/energie-a-zivotni-prostredi/energie-z-obnovitelnych-zdroju/vitr/informace-o-vetrne-energetice.html>
- [3] RYCHETNÍK, V., PAVELKA, J., JANOUŠEK J. Vetrné motory a elektrárny. 1. vydání. Vydavatelství CVUT Praha, 1997. 199 stran. ISBN 80-01-01563-7
- [4] Stanislav MIŠÁK [citace 2007] VUT_Brno prezentace, Analýza provozu verných elektráren

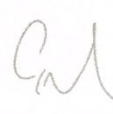
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010
Datum odevzdání: 06.05.2011




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Poděkování:

„Na tomto místě bych velice rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph.D., za velmi cenné rady, připomínky a vytrvalost při řešení mé diplomové práce, jakožto i mým kolegům.“

V Ostravě dne:

.....

Jindřich Stuchlý

Abstrakt:

Zadáním diplomové práce jsou energetické a ekonomické aspekty obnovitelných zdrojů elektrické energie. V první části jsou popsány možnosti instalací hybridních obnovitelných zdrojů elektrické energie včetně možnosti akumulace vyprodukované energie. Na tento oddíl navazují kapitoly se zdroji elektrické energie použité v hybridních systémech, slunce a vítr. V jednotlivých kapitolách jsou popsány historie obou zdrojů, principy přeměny energie, rozdělení jednotlivých typů a charakteristické veličiny.

V druhé části jsou popsány jednotlivé komponenty hybridního systému na VŠB – TU Ostrava. Součástí tohoto popisu jsou i detailnější deskripce hybridního systému a zdrojů elektrické energie, větrné elektrárny a fotovoltaických panelů včetně podružných systémů.

V třetí části jsou analyzovány vybrané energetické a ekonomické aspekty s následným hodnocením.

V závěru diplomové práce jsou shrnuty poznatky a rozebrány vlastnosti celého systému a provedeno závěrečné zhodnocení.

Klíčová slova: hybridní systém, fotovoltaická elektrárna, větrná elektrárna

Abstract:

The submission of theses is electric power and economical aspects of renewable sources of electric energy. In the first part will be described the installations possibilities of hybrid renewable sources of electric energy, including the possibilities of accumulation of produced energy. In this section are followed by chapters of power source used in the hybrid systems, sun and wind. In each chapter are described the histories of both sources as well as the principles of energy conversion, distribution of various types and characteristic magnitudes.

The second part are described the various components of the hybrid system at VŠB - TU Ostrava. This description is even more detailed description of a hybrid system of electric energy, wind power and photovoltaic panels, including secondary systems.

In the third part is analyzed the electric power and economical aspects, which is subsequently evaluated.

In conclusion, the thesis findings are summarized and analyzed the properties of the system and made the final evaluation.

Key words: hybrid system, photovoltaics power plant, wind power plant

Seznam použitých zkratek a symbolů: (abecedně seřazených)

AC – z ang. Alternate current – střídavý proud

A-Ampér – jednotka elektrického proudu

Ag-Cd sloučenina stříbro-kadmium

Ag-Zn sloučenina stříbro – zinek

AV ČR – Akademie věd České republiky

ČR – Česká republika

ČSÚ – Český statistický úřad

DC – z ang. Direct current – stejnosměrný proud

ERÚ – energetický regulační úřad

eV – elektron Volt – jednotka energie

FEI – fakulta elektrotechniky a informatiky

FV - fotovoltaiický

FVČ – fotovoltaiický článek

FVE – fotovoltaiická elektrárna

Hz – Hertz – jednotka frekvence

CHKO – chráněná krajinná oblast

$\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}$ měrná hmotnost

$\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$ – kilowatthodina na metr čtvereční – jednotka energetické hustoty

$\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ objemová energetická hustota

m – metr – jednotka délky

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – metr za sekundu – rychlost tělesa

$\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ – jednotka obsahu plochy na gram hmoty

n. m. – nad mořem

nm – nanometr – jednotka vlnové délky

Ni-Cd – sloučenina Nikl-Kadmium

Ni-Fe – sloučenina Nikl - Železo

Ni-MH – sloučenina Nikl – Metal Hybrid

Ni-Zn – sloučenina Nikl - Zinek

$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ otáčky za minutu – jednotka – vedlejší jednotka SI pro frekvenci

OZE – obnovitelné zdroje energie

P – činný výkon (W)

Q – jalový výkon (var)

V – Volt – jednotka elektrického napětí

VAch – Vollampérová charakteristika

VTE – větrná elektrárna

W – watt – hlavní jednotka výkonu

W·h – Watt hodina – jednotka elektrické energie

“ – palec – jednotka délky používaná v anglosaských zemích

€ - Euro – měna eurozóny

Δu_{nn} – výše relativní napěťové změny v sítích nízkého napětí

Obsah

1	ÚVOD	- 9 -
2	HYBRIDNÍ SYSTÉMY	- 10 -
2.1	POPIS HYBRIDNÍCH SYSTÉMŮ	- 11 -
2.1.1	<i>Grid-off instalace – ostrovní systémy</i>	- 11 -
2.1.2	<i>Grid-on instalace</i>	- 13 -
2.2	AKUMULACE ENERGIE	- 14 -
2.2.1	<i>Systémy pro akumulaci elektrické energie</i>	- 14 -
2.2.2	<i>Elektrochemické akumulátory</i>	- 15 -
2.2.3	<i>Superkapacity</i>	- 15 -
2.2.4	<i>Setrvačníky</i>	- 16 -
2.2.5	<i>Redox průtokové baterie</i>	- 17 -
2.2.6	<i>Vodíkový akumulační systém</i>	- 18 -
3	SLUNCE	- 19 -
3.1	HISTORIE FOTOVOLTAIKY	- 19 -
3.2	FYZIKÁLNÍ PRINCIP FOTOVOLTAICKÉHO JEVU	- 21 -
3.3	ROZDĚLENÍ ČLÁNKŮ	- 23 -
3.3.1	<i>Vícevrstvé články</i>	- 23 -
3.3.2	<i>Koncentrátorové články</i>	- 24 -
3.3.3	<i>Nové a teoretické koncepty</i>	- 25 -
3.4	PROCES VÝROBY PV ČLÁNKŮ	- 27 -
3.5	CHARAKTERISTICKÉ VELIČINY PRO FVE	- 29 -
3.6	SITUACE V ČR	- 34 -
4	VÍTR	- 35 -
4.1	HISTORIE VYUŽITÍ VĚTRU	- 35 -
4.2	VZNIK VĚTRU	- 35 -
4.2.1	<i>Beaufortova stupnice síly větru</i>	- 36 -
4.3	PRINCIP VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	- 37 -
4.3.1	<i>Konstrukce a technické podmínky</i>	- 38 -
4.4	ROZDĚLENÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	- 40 -
4.5	VĚTRNÁ MAPA	- 40 -
4.6	CHARAKTERISTICKÉ VELIČINY PRO VĚTRNOU ELEKTRÁRNU	- 43 -
5	HYBRIDNÍ SYSTÉM NA VŠB – TUO	- 45 -
5.1	BLOKOVÉ SCHÉMA HYBRIDNÍHO SYSTÉMU	- 46 -
5.2	VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA AP 12	- 49 -
5.3	FOTOVOLTAICKÉ PANELE XZST-180W	- 54 -
5.4	STŘÍDAČE	- 56 -
5.4.1	<i>Windy Boy 5000A</i>	- 56 -
5.4.2	<i>Windy Boy Protection Box</i>	- 57 -
5.4.3	<i>Sunny Island 3324</i>	- 57 -
5.4.4	<i>Sunny Boy 2100 TL</i>	- 58 -
5.5	SUNNY WEBBOX	- 58 -
5.6	BATERIE OPZS 420	- 59 -

6	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ – ENERGETICKÉ ASPEKTY	- 60 -
6.1	POSOUZENÍ LOKALITY	- 60 -
6.2	POROVNÁNÍ VÝKONOVÉ KŘIVKY VTE	- 63 -
6.3	VÝKONOVÁ BILANCE VTE	- 64 -
6.4	ČASOVÝ PRŮBĚH ENERGIE VTE	- 66 -
6.5	PRŮBĚH NAPĚTÍ A PROUDU	- 68 -
6.6	P-Q DIAGRAM	- 70 -
6.7	FOTOVOLTAICKÁ ČÁST SYSTÉMU	- 71 -
6.8	PREDIKCE VÝROBY POMOCÍ PVGIS.....	- 75 -
7	POSOUZENÍ EKONOMICKÝCH ASPEKTŮ.....	- 78 -
8	ZÁVĚR	- 82 -
9	SEZNAM ZDROJŮ.....	- 84 -

1 Úvod

Téma mé diplomové práce jsem si zvolil po dlouhé úvaze nad aktuálním stavem obnovitelných zdrojů elektrické energie a jejich využitím. Většina investorů, která vložila své finanční prostředky v období tzv. „solárního boomu“, potažmo finanční prostředky bankovních institucí s mnohdy nevýhodným úrokem, do fotovoltaických systémů, dnes svého činu lituje s ohledem na vývoj, který nastavila česká vláda. Zdanění finančních příjmů z prodeje elektrické energie z fotovoltaických systémů bylo ovšem krokem tím správným směrem a krokem nevyhnutelným.

Zdroje elektrické energie získané přeměnou slunečního záření na elektrickou energii byly v prvopočátku užity v kosmickém prostoru jako jediný spolehlivý zdroj energie. Pokud tyto podmínky vztáhneme na dnešní situaci, dopátráme se, že tomu tak není.

Mezi nejdynamičtější se rozvíjející zdroje elektrické energie bezpochyby patří fotovoltaické a větrné elektrárny, které jsou použity pro různé napěťové a výkonové hladiny. Oba jmenované zdroje ovšem v závislosti na svých vstupních veličinách, které přeměňují na elektrickou energii, lze klasifikovat jako zdroje nestabilní. To způsobuje nemalé potíže provozovatelům přenosových a distribučních sítí. Jednou z možností, jak předcházet potížím s vyvedením elektrického výkonu do sítě, je nedodávat jej vůbec. Tedy provozovat vlastní síť v autonomním režimu, kdy kombinací těchto zdrojů lze dosáhnout přímé lokální spotřeby přeměněné energie, nebo její uskladnění v podobě různých akumulacích zařízení a systémů, obzvláště pro nižší výkony výrobních jednotek. Tento ucelený systém dvou nebo více obnovitelných zdrojů, pracujících do jedné uzavřené soustavy ve stejné lokalitě, lze nazvat hybridním systémem.

Jak bylo uvedeno výše, jak energie sluneční, tak i energie větrná jsou nestabilními zdroji energie. Sloučením systémů využívajících tyto zdroje vyplývá, že v případě sníženého příkonu větrné energie je dodávka elektrické energie hrazena z fotovoltaického systému a naopak při sníženém příkonu sluneční energie může být deficit elektrické energie hrazen z elektrárny větrné.

Využití těchto systémů, například v podobě napájení rodinného domu s určitými energetickými standardy, bez nutnosti být připojen k elektrické distribuční síti, dává využití elektrické energie z obnovitelných zdrojů opravdový smysl, který by mohl nalézt uplatnění nejen v našich podmínkách, ale i celosvětově.

2 Hybridní systémy

V současnosti je elektřina nejběžnějším zdrojem energie v lidském životě. Vzhledem ke zlepšování životní úrovně se stává závislost na elektřině stále silnější. V odlehlých oblastech, daleko od veřejné elektrické sítě, jsou ostrovní napájecí systémy zdrojem tolik potřebné elektrické energie.

V odlehlých oblastech, kde jsou spotřeby elektrické energie relativně malé a rozptýlené a vytvoření a napájení z veřejné sítě by bylo příliš nákladné, by měl být výkon generován lokálně. Jednou z možností je použít dieselagregát, ovšem skladování a přeprava nafty jsou rovněž nákladné na velké vzdálenosti.

Sluneční energie je zdrojem veškeré energie na Zemi a je dosažitelná v každém koutě světa. Větrná energie je další forma sluneční energie, takže solární a větrná energie se vzájemně doplňují s vzájemné časové posloupnosti a regionu. Přes den, kdy je silné sluneční záření, je vítr v minoritním postavení. Při západu slunce, kdy sluneční záření zeslábne, naopak zesiluje vítr, to plyne z větších rozdílů teplot na povrchu Země. Tato situace se také opakuje v létě i zimě, kdy v létě je dostatek slunečního záření, ale větru daleko méně, a obráceně. Spojitost mezi solární a větrnou energií v časové posloupnosti dělá hybridní systém v podstatě ideálním pro zásobování oblastí elektrickou energií v místě spotřeby.

Hybridní systémy překonávají nedostatky jednotlivých instalací a soustřeďují jejich výhody v ostrovních provozech. Mezi další výhody ostrovních systémů je sdílení baterií nebo jiných systémů akumulace energie, tím se jejich pořizovací cena stává přijatelnější. Hybridní systém lze konfigurovat na základě definování spotřeby a zatížení, tedy stavu, který může zajistit spolehlivost napájení a snížit náklady na energetický systém.

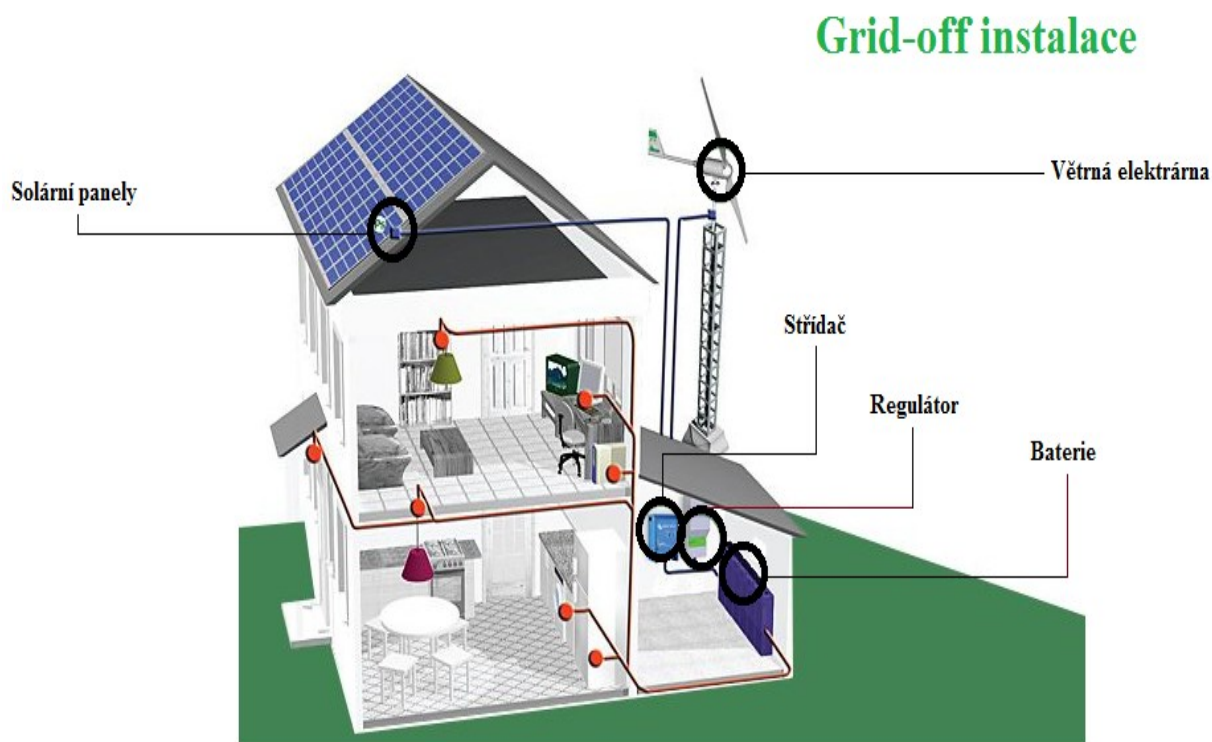
2.1 Popis hybridních systémů

Hybridní systémy sestavené z větrné a fotovoltaické elektrárny lze rozdělit z pohledu dodávky elektrické energie na hybridní systémy ostrovní tzv. Grid-off instalace a Grid-on systémy. Ostrovní systémy dodávají vyrobenou elektrickou energii nejčastěji do baterií, ale i do jiných akumulačních zařízení. Poté, co tuto elektrickou energii majitel následně spotřebuje ve svých elektrospotřebičích, inkasuje finanční prostředky, tzv. Zelený bonus. Grid-on systémy neakumulují vyrobenou elektrickou energii, ale veškerou energii dodají přes podružné systémy do distribuční sítě provozovatele, od kterého inkasují rovněž finanční prostředky.

2.1.1 Grid-off instalace – ostrovní systémy

Ne vždy je možnost využívat elektrickou energii dodávanou z distribuční sítě. Taková situace obvykle nastává na odlehlých chatách a chalupách, v zahradních domcích, v odlehlých průmyslových objektech a podobně. Na těchto místech se obvykle požaduje komfort domova v podobě možnosti poslouchat rádio, sledovat televizi nebo uložit si netrvanlivé potraviny do ledničky, případně se potřebuje elektrické energie k pohonu nějakého zařízení, například čerpadla nebo zavlažování. [1]

Mezi největší výhody hybridních systémů patří hlavně skutečnost, že oba systémy využívají obnovitelné zdroje energie, sluneční záření a vítr, který vzniká rovněž ze slunečního záření. Bohužel oba zdroje energie patří mezi nestabilní, a právě proto spojením těchto dvou jinak i samostatně využitelných systémů se docílí toho, že při výpadku jednoho z těchto dvou systémů, bude s vysokou pravděpodobností v provozu právě ten druhý. Vyplývá to z logiky věci, že když zrovna není dostatek slunečního záření a je zataženo, doprovázejí po většinou zataženou oblohu poryvy větru, které uvádějí do provozu větrnou elektrárnu. Zřídka kdy se stává, že by ani jeden z těchto přírodních zdrojů energie nebyl natolik dostačující, aby nebyly napájeny baterie, nebo jiné systémy akumulace energie. Také v tomto případě existuje možnost v podobě doplňkového zdroje energie, ať už například dieselagregátu, nebo elektrické přípojky z distribuční sítě. Ovšem systém je třeba dostatečně naddimenzovat.



obr. 2.1 Instalace v ostrovním režimu [2]

Instalace v ostrovním režimu je uvedena na *obr. 2.1*, kde jsou naznačeny jednotlivé komponenty systému a spotřebiče.

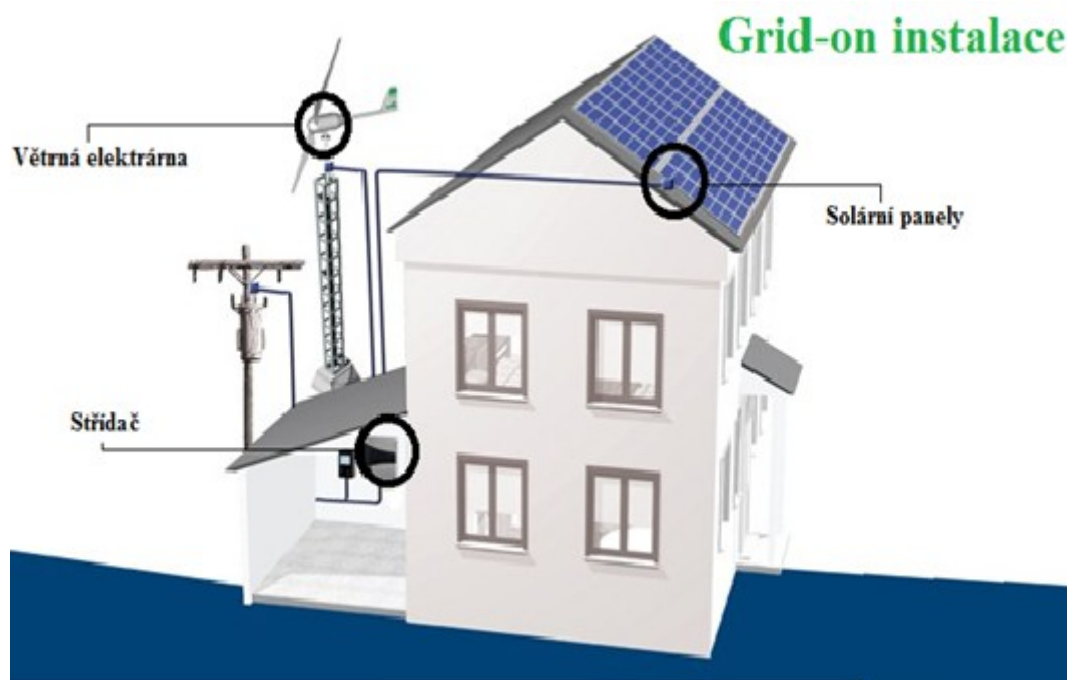
- Solární panely – produkují elektrickou energii pomocí slunečního záření. Nicméně je jejich použití limitováno dobou slunečního záření. V kombinaci s větrnou elektrárnou zaručují stabilní výrobu elektrické energie v průběhu celého roku. Počet solárních panelů a jejich výkon závisí na celkové energii potřebné pro instalaci.
- Větrná elektrárna – transformuje větrnou energii během dne nebo noci. Její výkon se pohybuje v poměru k potřebám instalace.
- Střídač – transformuje uloženou elektrickou energii do domácí sítě (230 V)
- Regulátor – zařízení kontrolující elektrickou energii ze solárních panelů a větrné elektrárny. Řídí také stav baterií, aby nebyla překročena kapacita baterií a zároveň jejich úplné vybití.

- Baterie – zajišťují uložení elektrické energie dodané ze solárních panelů a větrné elektrárny. Doporučuje se taková kapacita baterií, aby byly schopné dodávat elektrickou energii bez nabíjení po dobu nejméně tří dnů. [2]

2.1.2 Grid-on instalace

Hybridní systémy připojené k rozvodné síti nejsou vzhledem k relativně kvalitní síti a stálosti dodávek elektřiny instalovány z důvodu nedostatku elektrické energie, jako je tomu u ostrovních systémů. Motivem instalace je zpravidla ekologický přínos hybridního systému, který při výrobě elektřiny neprodukuje žádný oxid uhličitý, a dále jsou motivem pro pořízení hybridních systémů možné dosažitelné úspory a potažmo i zisk, který může z takové investice plynout.

Systémy připojené na síť jsou zpravidla budovány na rodinných domech nebo v průmyslových objektech, přičemž energie vyrobená systémem je buďto spotřebována přímo v daném objektu a případné přebytky jsou prodány do distribuční sítě, nebo je systém určen výhradně k výrobě a dodávání za výkupní cenu do distribuční sítě, tedy bez žádné vlastní spotřeby v místě instalace.



obr. 2.2 Instalace připojena do distribuční sítě [3]

- Solární panely – produkují elektrickou energii přeměnou slunečního záření, jsou ovšem limitovány dobou slunečního záření.
- Větrná elektrárna – transformuje větrnou energii během dne a noci.

- Invertor – synchronizuje energii vyrobenou pomocí solárních panelů a větrné elektrárny s parametry rozvodné sítě a připojuje systém do distribuční soustavy.

2.2 Akumulace energie

Akumulace elektrické energie v souvislosti s fotovoltaickými elektrárnami (FVE), které jsou v současnosti nejdynamičtější se rozvíjejícím OZE s nestabilní a obtížně predikovatelnou dodávkou elektrické energie, se pro řešení popsaných problémů provozu soustavy, do které FVE pracují, jeví jako velmi žádoucí. V případě výrobních jednotek nižších výkonů se ukazuje jako vhodnější jejich provozování v ostrovním režimu, kdy vyrobenou elektrickou energii dodávají do izolovaného systému spotřeby bez napojení do elektrizační soustavy. U tohoto systému je akumulace elektrické energie pro požadované pokrytí spotřeby rovněž nezbytná.

Z hlediska efektivnosti výhodný společný provoz elektrárny fotovoltaické a např. větrné v rámci jedné lokality, kdy se oba zdroje tohoto hybridního systému vzájemně doplňují, se v podmínkách ČR zatím takřka nevyskytuje. V následujícím je proto pozornost zaměřena na akumulační systémy využitelné čistě ve spojení s elektrárnami fotovoltaickými, provozovanými jak paralelně se sítí („grid-on“ systém), kdy dodávají elektrickou energii do distribuční sítě, tak pracujícími v autonomním ostrovním režimu („grid-off“ systém). Při paralelním provozu s distribuční sítí dodává fotovoltaická elektrárna do sítě elektrickou energii přes střídač, který zároveň zajišťuje přifázování elektrárny k síti a její automatické odpojení v případě výpadku sítě. Akumulační členy se v tomto případě provozu fotovoltaického systému běžně nepoužívají.

2.2.1 Systémy pro akumulaci elektrické energie

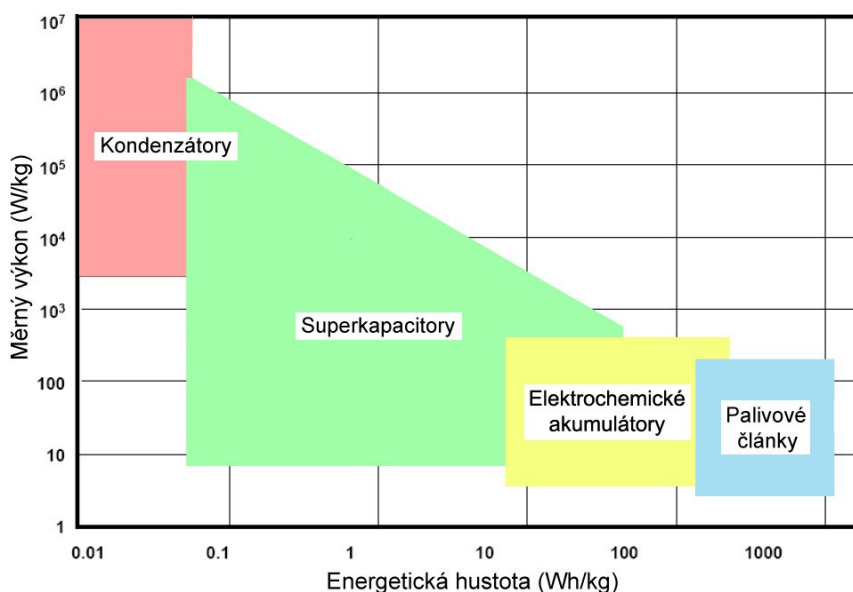
V souvislosti s rozvojem využívání energeticky významných obnovitelných zdrojů elektrické energie, jakými jsou fotovoltaické a větrné elektrárny, pokročil v poslední době výzkum a vývoj nových elektrochemických akumulačních prvků, které slouží především k vyrovnávání fluktuací výkonu těchto zdrojů a které k akumulaci elektrické energie využívají elektrochemických procesů. Tento vývoj se týká zejména tzv. průtokových baterií, u nichž se využívá redukčně-oxidačních reakcí v elektrolytu. Alternativním řešením akumulace elektrické energie může být i elektrochemický rozklad vody na vodík a kyslík v elektrolyzérech, kde vodík představuje umělé palivo, jehož lze využít ke zpětné přeměně na elektřinu v palivových článcích. Systémy, využitelné z hlediska akumulace elektrické energie z OZE, jsou popsány v následujících kapitolách.

2.2.2 Elektrochemické akumulátory

Podle elektrolytu použitého v článku se tyto akumulátory rozdělují na kyselé (olověné), alkalické s elektrolytem na bázi vodného roztoku hydroxidu kovu (nejčastěji KOH) a s nevodnými, tuhými nebo roztavenými elektrolyty. Podle použitých aktivních hmot elektrod se alkalické akumulátory dělí na Ni-Cd, Ni-Fe, Ni-Zn, Ni-MH, Ag-Zn a Ag-Cd. Jedním z hlavních parametrů těchto akumulátorů je počet nabíjecích cyklů, který se pohybuje v řádech stovek až tisíců. Vnitřní odpor akumulátoru je tvořen odporem jednotlivých částí všech článků po celé dráze proudu, tzn. odporem elektrod, kovových spojek a elektrolytu. Kromě způsobu nabíjení a vybíjení je značně ovlivňuje i provozní teplota. Elektrochemické akumulátory se nehodí příliš tam, kde se vyžadují velké nárazové proudy. V souvislosti s fotovoltaickými systémy se tyto akumulátory používají pouze u systémů autonomních, bez připojení na distribuční síť. Mezi fotovoltaikou a akumulátorem je zapojen regulátor nabíjení, jenž řídí průběh nabíjení a vybíjení akumulátoru a zajišťuje, aby nedošlo k jeho poškození.

2.2.3 Superkapacitory

Superkapacitor, též ultrakapacitor, je v principu elektrolytický kondenzátor, který má oproti klasickým kondenzátorům o několik řádů vyšší kapacitu a tím i větší hustotu energie. Dvěma hlavními parametry kondenzátorů jsou hustota energie a měrný výkon. Klasické kondenzátory dosahují poměrně vysokých měrných výkonů, ale mají poměrně nízkou hustotu energie v porovnání s elektrochemickými akumulátory. Ty mohou akumulovat více celkové energie, ale nezvládají ji uvolňovat dostatečně rychle, a proto mají menší měrný výkon. Superkapacitory jsou založeny na stejném principu jako klasické kondenzátory. Kombinují však v sobě elektrody z mikroporézního aktivovaného uhlíku, jenž se vyznačuje extrémním povrchem až $2000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, a zároveň mnohem tenčí dielektrikum, díky kterému se snižuje vzdálenost mezi elektrodami. Tyto rozdíly pak vedou k nárůstu jak kapacity, tak i akumulované energie. Superkapacitory mají řadu výhod oproti elektrochemickým akumulátorům a palivovým článkům, zejména vyšší výkonovou hustotu, kratší nabíjecí čas a delší životní cyklus. Nevýhodou ve srovnání s nimi je malá energetická hustota. Srovnání superkapacitorů s ostatními akumulačními systémy je na *obr. 2.3*.



obr. 2.3 Porovnání superkapacitorů s dalšími akumulacími systémy

2.2.4 Setrvačníky

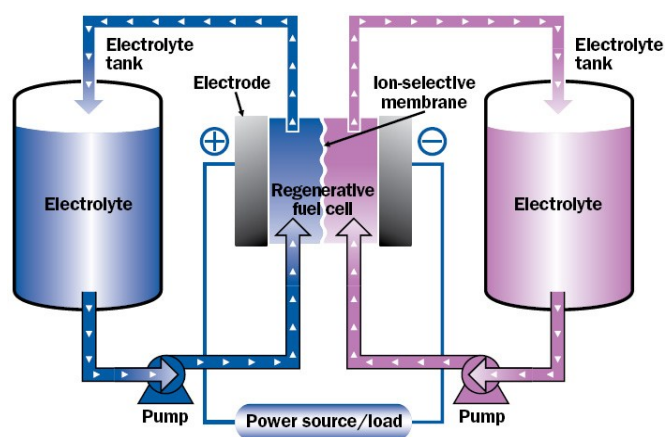
V současné době se tato technologie využívá zejména v aplikacích vyžadujících rychlou dodávku velkého výkonu, která by při odběru z distribuční sítě způsobila velké rušení vlivem náhlého poklesu proudu. Klasické setrvačníky pro akumulaci energie jsou nejčastěji kovové s mechanickými ložisky a otáčkami okolo $4000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Při použití materiálů, které jsou pevné a zároveň lehké, spolu s magnetickými ložisky a vakuem, které slouží k omezení odporu vzduchu, je možné dosáhnout až $100\,000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Akumulační schopnosti moderních setrvačnicků jsou srovnatelné s elektrochemickými akumulátory, avšak setrvačníky je možné mnohem rychleji nabít i vybit. Účinnost setrvačnicků se pohybuje kolem 80 %. V současnosti se vyrábějí setrvačníky s výkonem od několika kW až do cca 1 MW. Jejich předností je možnost paralelního chodu více jednotek. Hlavní nevýhodou setrvačnicků je bezpečnost jejich provozu, s čímž je zároveň spojená i vyšší cena, přibližně dvojnásobná oproti bateriím.

Systémy na bázi setrvačnicků nebo superkapacitorů jsou vhodné tam, kde je nutné pokrýt velkou spotřebu po krátkou dobu. I když hlavní oblastí jejich použití je doprava, kde umožňují dodat energii pro akceleraci a naopak akumulují energii při brzdění (rekuperace), mohou nalézt uplatnění rovněž ve spojení s OZE při vyrovnávání kolísání jejich výkonu. Mohou zde být vhodným doplněním jiného (hlavního) systému akumulace energie.

2.2.5 Redox průtokové baterie

Jádrem tohoto systému je reverzibilní redukčně-oxidační článek, v němž probíhá přeměna energie elektrické na chemickou, vázanou v elektrolytu. Využívá se k tomu schopnosti určitých chemických prvků, např. vanadu, vyskytovat se ve více valenčních uspořádáních. U Redox baterií dochází k průběžné výměně elektrolytu, čímž je zajištěn kontinuální provoz, prakticky dokud nedojde zásoba elektrolytu. Elektrolyty cirkulují ve dvou okruzích oddělených ve vlastním článku baterie iont-měničovou membránou (PEM), viz. obr. 2.4. Uvnitř článku se jedna forma elektrolytu elektrochemicky oxiduje a druhá redukuje působením elektrického proudu přiváděného, nebo odváděného elektrodami do vnějšího elektrického obvodu.

Akumulační kapacita je dána množstvím elektrolytu v zásobnících, přičemž prakticky dosažitelná objemová energetická hustota elektrolytu úplného nabíjecího (vybíjecího) cyklu je uváděna v rozsahu 15 až 25 kW·h·m⁻³, ideálně dosažitelná hodnota pak činí až 43 kW·h·m⁻³. Měrná hmotnost baterie dosahuje 6,5 až 10 kg·kW⁻¹ u větších systémů, u malých výkonů nanejvýš 12,5 kg·kW⁻¹. Hmotnost elektrolytu představuje cca 90 % hmotnosti celého systému. V porovnání s klasickými akumulátory má elektrolyt v nabitém stavu při cirkulaci v baterii jen nepatrné samovybíjení. Elektrolyt uskladněný v zásobníku zůstává nabitý prakticky po neomezenou dobu. Systém nevykazuje pokles účinnosti ani kapacity, a to ani po více než 12 tisících nabíjecích cyklů. Předpokládaná životnost membrán v článcích baterie je zhruba 15 let.



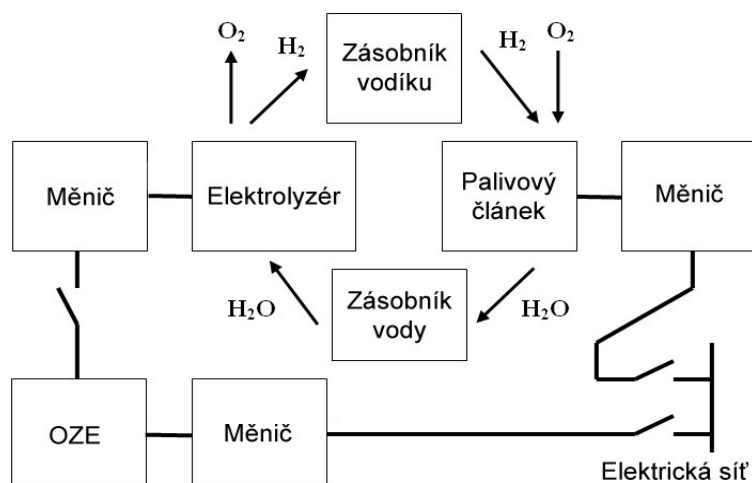
obr. 2.4 Principiální schéma Redox průtokové baterie

U systému pro akumulaci energie v řádu MW·h se pořizovací náklady pohybují mezi okolo 600 € kW·h, u 100 MW·h systému pak okolo 450 € za kW·h. Rozšíření akumulační kapacity (množství elektrolytu) vychází na cca 250 € za kW·h. Provozní náklady se omezují jen na pravidelné roční kontroly stavu zařízení, provoz je automatický a programovatelný v systému řízení a kontroly.

Při kontinuálním provozu je nutná výměna jedinečných pohyblivých částí - oběhových čerpadel elektrolytu po cca 7 letech. Náklady na údržbu a provoz jsou odhadovány na 0,008 € za kW·h.

2.2.6 Vodíkový akumulací systém

Hlavními částmi tohoto systému jsou elektrolyzátor, zásobník vodíku, zásobník demineralizované vody a vodíkový palivový článok. Dalším nezbytným zařízením jsou polovodičové měniče. Elektrická energie z OZE je akumulována do vodíku, vyrobeného elektrolyzátorem vody, a to vždy v době, kdy je zatížení elektrizační soustavy nižší. Vodík je uskladněn v tlakovém zásobníku. V době zvýšeného zatížení soustavy se použije pro výrobu elektrické energie v palivovém článku, jehož dalšími produkty jsou již jen voda a teplo. Schématické znázornění vodíkového akumulacího systému je na *obr. 2.5*.



obr. 2.5 Blokové schéma vodíkového akumulacího systému

Množství vyrobeného vodíku je závislé na proudové hustotě. Současné elektrolyzéry mají energetickou účinnost až 80 %. Přes nízkou objemovou energetickou hustotu, má vodík nejvyšší poměr energie k hmotnosti ze všech paliv. Může být skladován jako plyn při vysokých tlacích, jako kapalina v kryogenních zásobnících, nebo jako plyn chemicky vázaný v metalhydridech. Celkové množství akumulované energie je závislé jen na velikosti zásobníku vodíku. Nejjednodušším typem palivového článku je článek vodíkový, jehož funkce je inverzní k funkci elektrolyzátoru. Vodík je přiváděn k anodě, kde dochází k oxidaci a uvolňování elektronů, jenž prochází vnějším elektrickým obvodem ke katodě za současného vzniku iontů OH^- v elektrolytu. Ke katodě je přiváděno okysličovadlo (kyslík), kde s ionty OH^- reaguje za vzniku vody. Energetická účinnost palivového článku je až 50 %. Výkon obou popsaných zařízení vodíkového systému přímo souvisí s plochou jejich elektrod. [4]

3 Slunce

3.1 Historie fotovoltaiky

Termín „fotovoltaika“ je odvozen spojením řeckého slova pro světlo „photos“ a slova „Volt“, název jednotky elektromotorické síly - síly, která způsobuje pohyb elektronů (tj. elektrický proud). Volt byl pojmenován po italském fyzikovi hraběti Alessandro Voltovi. Fotovoltaika tak popisuje výrobu elektřiny ze světla.

Objev fotovoltaického jevu je obecně přisuzován francouzskému fyziku Edmondovi Becquerelovi, který v roce 1839 vydal publikaci, kde popisoval jeho experimenty s „mokrým článkem“ baterie, při kterých zjistil, že se napětí baterie zvyšovalo, pokud byly stříbrné desky vystaveny slunečnímu záření.

První zpráva o fotovoltaickém jevu v pevné látce se objevila v roce 1877, když jej dva vědci z Cambridge, W. G. Adams a R. E. Day, popsali v publikaci pro Královskou společnost.

V roce 1883 Charles Edgar Fritts, elektrikář z New Yorku, zkonstruoval selenové solární články, které byly v některých ohledech podobné křemíkovým solárním článkům, jak je známe dnes. Byly složeny z tenkých destiček selenu, pokryté mřížkou s velmi tenkými zlatými dráty a ochrannou fólií ze skla, ale jeho článek byl velmi neefektivní. Účinnost solárních článků je definována jako procento sluneční energie dopadající na jeho povrch, které je přeměněno na elektrickou energii. Méně než 1% sluneční energie dopadající na tyto prvotní články bylo přeměněno na elektřinu. Přesto články ze selenu nakonec vstoupily do širokého užití ve formě expozice u fotografických přístrojů.

Důvody pro neúčinnost těchto prvních zařízení byly zjevné o mnoho let později, během první poloviny dvacátého století, kdy fyzici jako Planck a Einstein stanovili nové pohledy do povahy záření a základní vlastnosti materiálů.

V roce 1950 došlo k průlomů, který uvedl do pohybu vývoj moderních, vysoce-účinných solárních článků. Ten se konal v Bellových telefonních laboratořích (Bell Labs) v New Jersey v USA, kde řada vědců, včetně Darryla Chapina, Calvina Fullera a Geralda Pearsona, zkoumala účinky světla na polovodičích. O několik let dříve, v roce 1948, další dva výzkumníci z Bellových laboratoří, Bardeen a Brattain, vyprodukovali další revoluční zařízení pomocí polovodičů - tranzistor. Tranzistory jsou vyrobeny z polovodiče (obvykle křemík) ve velmi čisté krystalické formě, do které je přidáno malé množství pečlivě vybraných „nečistot“, jako je bór nebo fosfor. Tento proces, známý jako doping, dramaticky mění elektrické chování polovodičů velmi užitečným způsobem, který bude podrobně popsán dále.

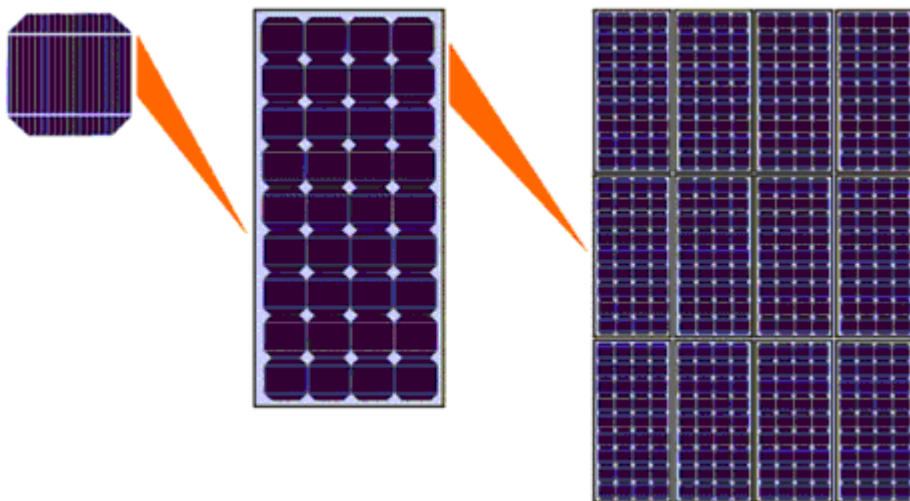
V roce 1953 tým Chapin-Fuller-Pearson, v návaznosti na předchozí výzkum Bellových Laboratoří o vlivu fotovoltaiického jevu na křemíku, vyprodukoval „dopované“ křemíkové plátky, které byly mnohem účinnější než starší zařízení na výrobu elektrické energie ze slunečního záření.

V následujícím roce napsali dokument o jejich práci a podařilo se jim zvýšit účinnost přeměny svých křemíkových solárních článků na 6 %. Bellovy Laboratoře pokračovaly v demonstraci praktického využití solárních článků, například v napájení venkovního telefonního zesilovače, ale v té době byly příliš drahé na to, aby se tento zdroj energie rozšířil ve většině podobných aplikací.

V roce 1958 však byly solární články použity k pohonu malého rozhlasového vysílače v druhém satelitním prostoru USA, Vanguard I. Po této první úspěšné demonstraci solárních článků se jejich použití jako zdroje energie pro kosmické plavidla stala téměř univerzálním standardem.

Rychlého pokroku ve zvýšení účinnosti a snížení nákladů fotovoltaiických článků bylo dosaženo v průběhu několika posledních desetiletí. Jejich pozemská využití jsou nyní na vzestupu, zejména v poskytování energie pro telekomunikace, osvětlovací a ostatní elektrické spotřebiče v odlehlých místech, kde by byl přívod konvenční elektřiny příliš nákladný.

Jeden konvenční fotovoltaiický článek produkuje v průměru 1,5 Wattů, takže získáním větší energie docílíme spojením skupiny článků, aby vytvořily pravoúhlé moduly. K dosažení ještě většího výkonu jsou moduly spojeny dohromady a tvoří společně fotovoltaiické pole.



obr. 3.1 solární FV článek, solární FV panel, solární FV pole [5]

Fotovoltaiika nyní může díky svému potenciálu poskytnout podstatnou část energetických potřeb nově rostoucím domácím, komerčním a průmyslovým budovám.

Účinnost nejlepších jednovrstvých křemíkových solárních článků nyní dosahuje 24% v laboratorních zkušebních podmínkách. Nejlepší křemíkové fotovoltaické komerčně využívané moduly jsou nyní k dispozici a mají účinnost přes 17%, a očekává se, že účinnost modulů bude za 10 let na více než 20 %. [6]

3.2 Fyzikální princip fotovoltaického jevu

K tomu, aby byla přeměněna energie proudů fotonů (slunečního záření) v energii pohybujících se elektronů (elektrického proudu) se potřebují v zásadě jen dvě věci, a to:

- Volné elektrony
- Elektrický potenciál (pole), který je uveden do pohybu směrem ze zdroje do spotřebiče

Volné elektrony nepředstavují problém, jelikož jsou k dispozici v každém běžném kovu, ale problémem je, jak jim dodat potřebnou energii a usměrnit jejich tok potřebným směrem.

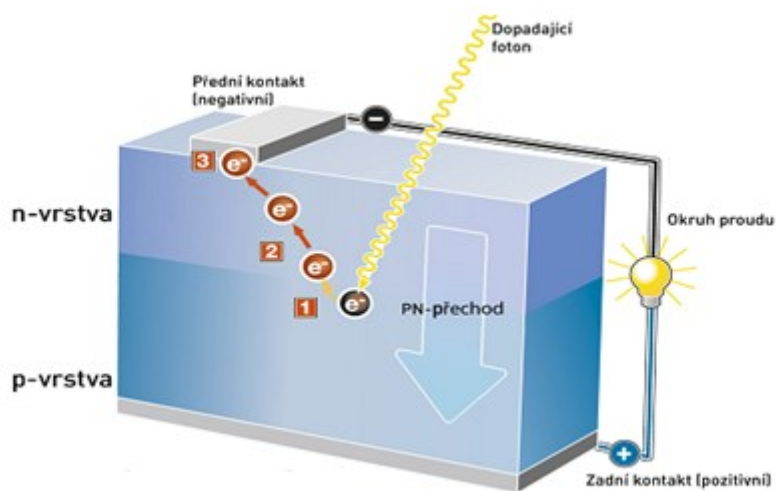
Sluneční záření se chová, jako by bylo tvořeno proudem částic, jež A. Einstein nazval fotony. Foton slunečního záření dokáže předat svou energii elektronu v kovu nebo polovodiči, tedy samotný přenos energie z fotonu na elektron je možný. Již od 19. století je známo, že pokud na kov dopadá sluneční záření, tak dochází k uvolňování elektronu z jeho povrchu. Jestliže je energie záření dostatečná, elektron opustí povrch kovu a zanechá v kovu kladný náboj – díru. Jde o tzv. fotoelektrický jev. Pokud ovšem elektron zůstane v kovu, čehož potřebujeme docílit, aby nám prošel skrze vodiče a zátěž. Pak je zase velmi rychle přitažen k díře, která po něm zbyla, a jeho energie se uvolní jako neužitečné teplo. Proto je nutné oddělit elektrony od děr a přimět elektrony, aby před tím, než zapadnou zpět do díry, prošly elektrickým obvodem a vydaly získanou energii ze slunečního záření ve formě užitečné práce v našem spotřebiči. Tento proces je lépe realizovatelný v polovodičích než v kovech. Jelikož jsou polovodiče materiály s vlastnostmi mezi vodiči a izolanty, není v nich dostatek volných elektronů jako v kovech, ale relativně levně mohou vzniknout např. teplem nebo dopadem slunečního záření.

K tomuto oddělení elektronů z děr je zapotřebí v polovodiči vytvořit P-N přechod. Tento P-N přechod je základem celé moderní elektrotechniky. Pochopení principu funkce tohoto P-N přechodu je nezbytné k pochopení práce fotovoltaických článků. Podstatu vzniku lze vysvětlit na nejběžnějším polovodičovém materiálu – křemíku. Tuhý křemík je tvořen mřížkou atomů křemíku, které jsou navzájem spojeny kovalentními vazbami, a na rozdíl od kovů se v křemíku žádné volné elektrony, k atomům nevázané, nevyskytují. Kovalentní vazby v křemíku nejsou tak pevné, jako je tomu

například u uhlíku ve formě diamantu. K uvolnění elektronů z vazeb stačí u křemíku dodat poměrně malé množství energie.

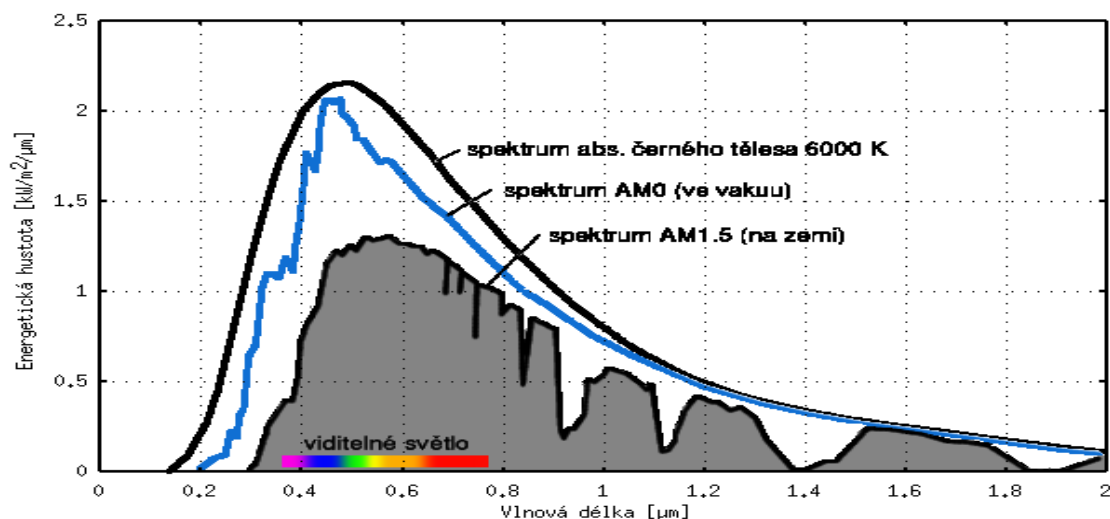
Při pokojové teplotě má tedy vždy nějaké malé množství elektronů dostatečnou energii na to, aby se uvolnilo z vazeb a dostalo do neobsazeného (vodivostního) pásu. Křemík proto na rozdíl od diamantu vede elektrický proud. Se zvyšováním teploty se křemík stává více vodivým, a to díky tomu, že se do vodivostního pásu dostává více elektronů. Podobná situace nastává i při osvětlení křemíku slunečním zářením. Vodivost se značně mění, jestliže křemík obsahuje určité příměsi. Zpravidla se přidává malé množství fosforu nebo boru – jedná se o dopování křemíku. Fosfor má ve valenční vrstvě 5 elektronů, ale ve vazbách okolního křemíku se mohou uplatnit pouze 4 elektrony. Dopováním křemíku fosforem vzniká polovodič typu N, který má za následek nadbytečné elektrony a je daleko více vodivý než čistý křemík. Analogicky dopováním křemíku borem se 3 elektrony vzniká polovodič typu P s nadbytečnými dírami. Pokud se spojí oba tyto polovodiče, vzniká v místě jejich dotyku velmi tenká vrstva, jejíž název je P-N přechod. Koncentrace elektronů je větší u polovodičů typu N než u typu P, s dírami je to přesně naopak.

Spojíme-li dohromady polovodiče typu P a N, dochází k tomu, že ve snaze vyrovnat koncentrace difundují elektrony do části P a díry do části N. Tento jev se nazývá rekombinace nábojů a výsledkem je elektrický potenciál. Vzniklé elektrické pole další difúzi zastaví, a tak dojde k rovnováze mezi částí P a N. Výsledkem procesu je výrazné snížení vodivosti v oblasti P-N přechodu a vytvoření elektrického potenciálu. Této vlastnosti P-N přechodu se využívá v usměrňovacích diodách, kdy na stranu P přivedeme kladný pól zdroje napětí a na stranu N záporný pól zdroje, a tudíž může proud přes P-N přechod procházet. Vlastní fotovoltaický článek je vlastně „taková velkoplošná dioda“. Je vytvořen tak, že v tenkém plátku křemíku je v malé hloubce pod povrchem vytvořen P-N přechod, opatřený z obou stran vhodnými kovovými kontakty.



obr. 3.2 znázornění principu fotovoltaického článku [7]

Napětí fotovoltaického článku je dáno použitým materiálem. V případě křemíku je to přibližně 0,6 V. Udává se, že při optimálním proudu, kdy je výkon článku maximální, je hodnota napětí 0,5 V. Aby se získalo využitelné napětí, je potřeba spojovat články do série, z pravidla je to 36 nebo 72 článků, které dodávají 18 nebo 36 V. Křemíkový článek může využít fotony s energií větší než 1,1 eV, což představuje záření o vlnové délce 1100 nm – pro fotony platí, že čím menší je jejich vlnová délka, tím větší mají energii. Sluneční záření procházející atmosférou obsahuje fotony s energií od 0,5 eV – infračervené záření do asi 2,9 eV – ultrafialové záření. [8]



obr. 3.3 rozložení slunečního spektra [9]

Energie fotonů s kratší vlnovou délkou není ale využita beze zbytku, každý foton uvolní jen jeden elektron a přebytek energie se přemění v teplo.

3.3 Rozdělení článků

Fotovoltaické články prošly dlouhým vývojem a dělí se kvůli přehlednosti do jednotlivých generací, základní generace jsou popsány v [10].

3.3.1 Vícevrstvé články

Vyšší účinnosti lze dosáhnout použitím více vrstev, z nichž každá využívá pouze část slunečního spektra - fotony, jejichž energie je vyšší než šířka zakázaného pásu dané vrstvy - a ostatní záření propouští do nižších vrstev. Dvouvrstvé články mohou dosáhnout teoreticky účinnosti 42 %, třívrstvé 49 %, šestivrstvé kolem 65 %. Limit pro nekonečný počet vrstev je 68 %.

Účinnost špičkových komerčně dostupných třívrstvých článků se pohybuje těsně pod hranicí 30 %. Vícevrstvé články jsou výrobně výrazně náročnější než články jednovrstvé, tomu odpovídá i

jejich cena, která v přepočtu na watt výkonu je asi 2x až 3x vyšší než u současných technologií. V řadě případů jsou používány suroviny, jejichž dostupnost pro předpokládaný rozvoj fotovoltaických systémů není v dlouhodobém horizontu zajištěna.

Pokud by se měly vícevrstvé články prosadit ve větších objemech, muselo by se přejít na dostupnější materiály. Přitom by cena článků musela klesnout výrazněji než u současných technologií. Doménou vícevrstvých článků jsou systémy pro napájení družic, kde je vyšší cena vysoce vyvážena lepším poměrem výkonu k hmotnosti.

Komerčně dostupné a cenově přijatelné jsou tenkovrstvé křemíkové tandemové články. Amorfni křemík má větší šířku zakázaného pásu (1,7 eV) než krystalické formy křemíku. To umožňuje vytvářet dvojvrstvé (tandemové) tenkovrstvé články, u nichž jedna vrstva je tvořena amorfni, druhá mikrokrytalickým křemíkem (a-Si/ μ c-Si). Dosahované účinnosti jsou však daleko od teoretického maxima, v současnosti se u komerčních článků teprve blíží úrovni 10 %.

3.3.2 Koncentrátorové články

Pro jejich použití hovoří dva důvody. Především lze při vyšších intenzitách slunečního záření dosáhnout vyšší účinnosti. Teoreticky 41 % pro jednovrstvé, 55 % pro dvojvrstvé a 63 % pro třívrstvé články, limit pro nekonečný počet vrstev je 86 %. Při praktických měřeních přesáhly třívrstvé články účinnosti i přes 40%.

Druhým důvodem je cena vícevrstvých článků, která je výrazně vyšší než cena dnes nejběžnějších článků jednovrstvých. Zrcadla nebo Fresnelovy čočky používané ke koncentraci slunečního záření jsou neporovnatelně levnější než polovodičové články. K jejich výrobě lze použít obecně dostupné materiály. Spotřeba drahých polovodičových materiálů na samotné články může klesnout až o dva řády.

Uvedené výhody jsou kompenzovány nutností používat velmi přesné, a tedy investičně i provozně náročnější, polohovací systémy. Problém je rovněž s chlazením koncentrátorových článků, při koncentračním poměru 1:1000, dosahuje intenzita dopadající energie až 1 MW·h. Životnost koncentrátorových článků v praktickém provozu je proto relativně nízká. Tím se složitost a investiční i provozní náročnost celého systému ještě více komplikuje. Pokud bude problém chlazení článků zvládnut, bude jeho výhodou možnost využít nízkopotenciální teplo z chladicího systému.

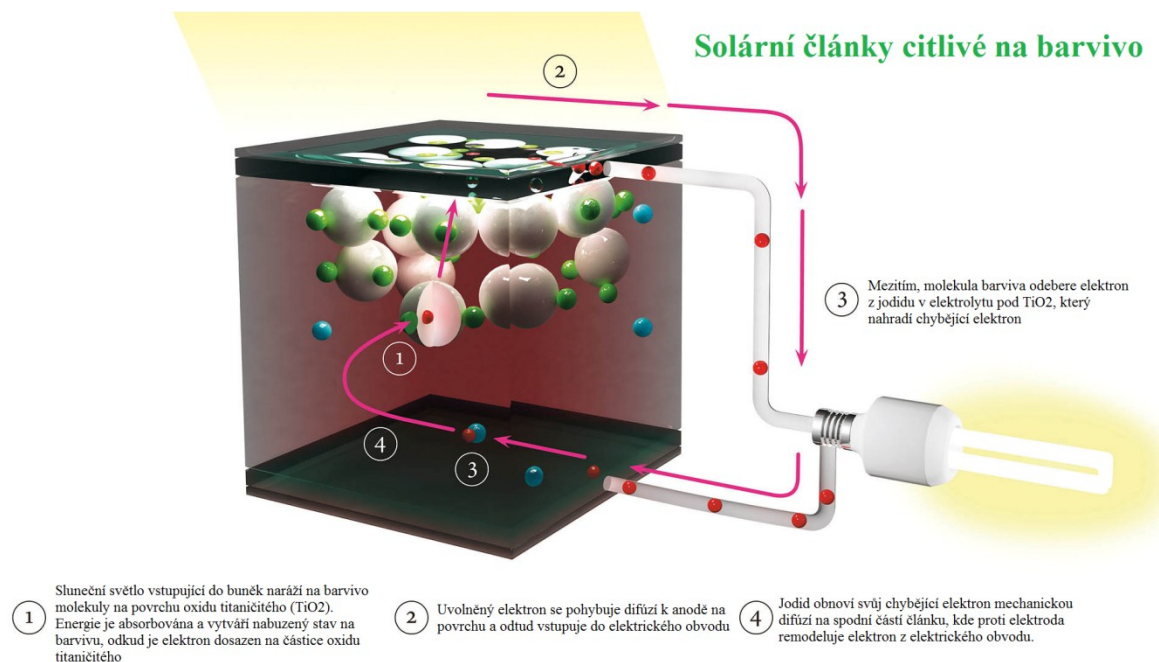
Koncentrátorové systémy využívají pouze část dopadající energie - přímé sluneční záření. Difúzní záření, jehož podíl je v České republice přes 50 %, využít nelze. Časové využití instalovaného výkonu by v klimatických podmínkách ČR bylo nižší než u současných systémů přesto, že při jasné obloze poskytují koncentrátorové systémy vyšší a v průběhu dne vyrovnanější výkon. Pro použití v

ČR by z uvedených důvodů cena koncentrátorových systémů musela být zhruba poloviční ve srovnání se současnými technologiemi.

3.3.3 Nové a teoretické koncepty

V současnosti je rozpracovávána celá řada konceptů, které slibují do budoucna výrazné zvýšení účinnosti. Většina z nich je pouze ve fázi teoretického odhadu dosažitelné účinnosti, není však známo, jak je realizovat v praxi. Níže jsou uvedeny jen některé z těch, u nichž již byly realizovány první experimenty:

- speciální nanostruktury, tzv. supermřížky, umožňující řídit šířku zakázaného pásu (quantum dot, quantum well), cílem výzkumu je vytvořit takové struktury z levných a dostupných materiálů, například křemíku
- luminofory, které konvertují široké sluneční spektrum do užší oblasti, která lépe odpovídá šířce zakázaného pásu použitého fotovoltaického článku (up/down converters)
- termo-fotovoltaické články, selektivní absorbér ohříváný slunečním zářením vyzařuje dlouhovlnné záření v úzkém pásmu, které odpovídá šířce zakázaného pásu použitého fotovoltaického článku. [11]



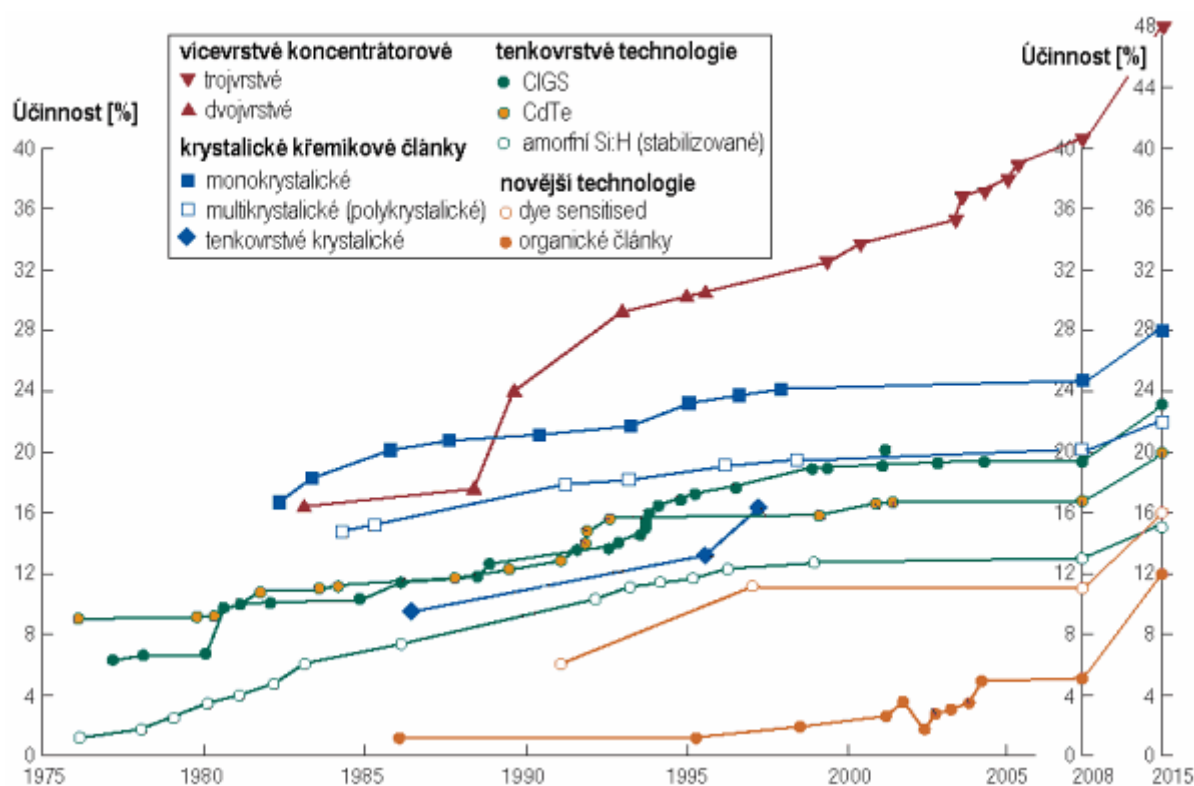
obr. 3.4 Grätzelův článek[12]

Na obr. 3.4 znázorněn Grätzelův článek (nebo také barvivem senzitivizovaný článek). Je založen na zachycení světla na barvivem fotosenzitivizované polovodivé anodě s následnou regenerací

barviva elektrolytem. Tento článěk byl vynalezen Michaelem Grätzelem a Brianem O'Reganem v roce 1991.

Tento článěk je technologicky atraktivní, neboť je tvořen z relativně levných materiálů a levným výrobním procesem. Jeho výroba je mnohem levnější než výroba starších metod založených na vysoce čistém křemíku, jehož výroba je energeticky náročná. Může být upraven do flexibilních listů a je mechanicky poměrně robustní, takže nepotřebuje další ochranu proti poškození například padáním větví a krup.

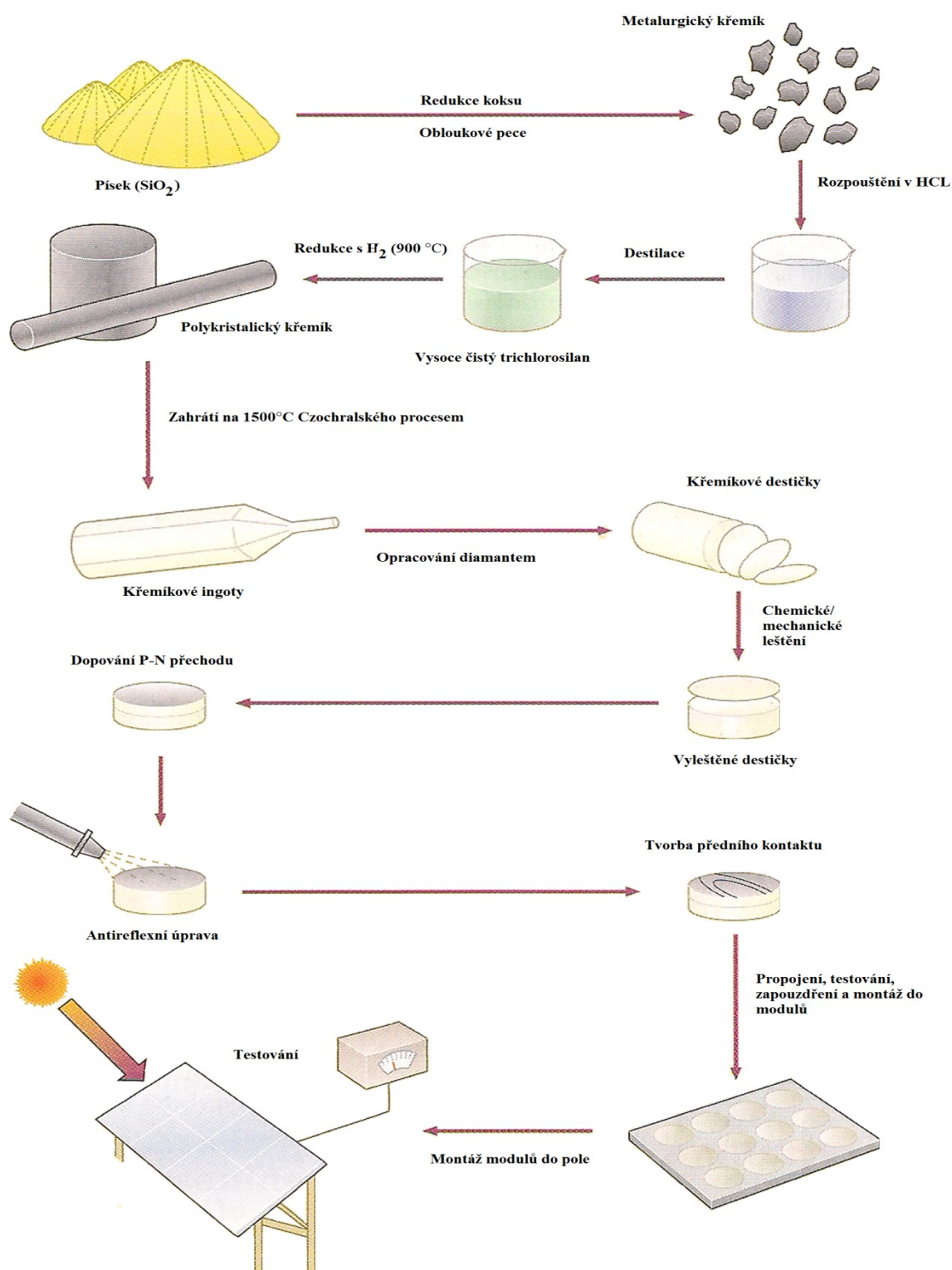
Přestože jeho konverzní účinnost je menší než u nejlepších křemíkových článků, jeho poměr cena/výkon by měla být dostatečná, aby se více rozšířil. Komerční aplikace, které byly zpočátku zpomaleny problémy s chemickou stabilitou článků, se nicméně stále častěji objevují. [12]



obr. 3.5 účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků [11]

Na obr. 3.5 jsou chronologicky znázorněny postupné úspěchy ve vývoji účinnosti v různých strukturách fotovoltaických článků.

3.4 Proces výroby PV článků



obr. 3.6 proces výroby fotovoltaických panelů [6]

Životní cyklus výrobku zahrnuje všechny fáze od těžby surovin, výroby polotovarů a konečných výrobků přes dobu užívání až po recyklaci nebo likvidaci na konci životnosti a dopravu jednotlivých surovin. Podobný řetězec lze vysledovat pro ostatní komponenty fotovoltaického systému – měnič, nosná konstrukce případně tracker a další.

Zpočátku byl pro výrobu fotovoltaických článků používán odpadní křemík z výroby mikroelektronických součástek, protože požadavky na kvalitu solárního křemíku jsou nižší. S růstem výrobních kapacit však tento zdroj přestal dostačovat. Proto byly budovány nové kapacity speciálně na výrobu solárního křemíku. Původní výrobní postupy byly s ohledem na nižší požadavky upraveny tak, aby se snížila spotřeba energie. I přes tyto úpravy však podíl výroby desek na celkové spotřebě energie dosahuje 80 %.

Spotřeba energie na tažení monokrystalických ingotů vykazuje velké rozdíly mezi výrobci. Nižší spotřebu vykazují novější zařízení. Spotřeba klesá při větších průměrech; je zvládnuto tažení ingotu průměru 450 mm, ve fotovoltaice se přechází na standardní rozměr desek 6“ (156 mm × 156 mm).

Spotřeba energie na výrobu multikrystalických ingotů je výrazně nižší. Rozdíly mezi výrobci jsou způsobeny zejména různou velikostí ingotů. Do budoucna lze zvažovat rekuperaci tepla pro předehřev následující dávky. Problém představuje vysoká investiční náročnost a dlouhá životnost zařízení. Zlepšení lze tedy očekávat v delším horizontu.

Spotřeba energie na řezání desek závisí na šířce řezu a ploše, její podíl je méně významný, nelze ji však podstatným způsobem snížit. Lze snižovat spotřebu pomocných materiálů, a to recyklací brusné emulze.

U výroby článků z hlediska spotřeby energie nedošlo ve výrobě k tak výrazným změnám jako při výrobě solárního křemíku. Jedním z důvodů bylo, že podíl spotřeby energie na výrobu článků byl v celkové bilanci méně významný. V současnosti nad snahou o snižování spotřeby energie ve výrobě článků převažuje snaha o zvyšování účinnosti. V důsledku spotřeby energie ve výrobě mírně narůstá.

Spotřeba energie na samotnou kompletaci panelů je relativně nízká. Rychlotavné formulace EVA mohou přinést jen neznatelné zlepšení. Větší podíl představuje spotřeba energie na výrobu skla, rámu a laminační fólie. Samotný rám představuje 8 % celkové energetické náročnosti výroby panelů. Proto jsou vyráběny i panely bez rámu. S ohledem na snadnou a energeticky nenáročnou recyklaci však tato praxe není nutná.

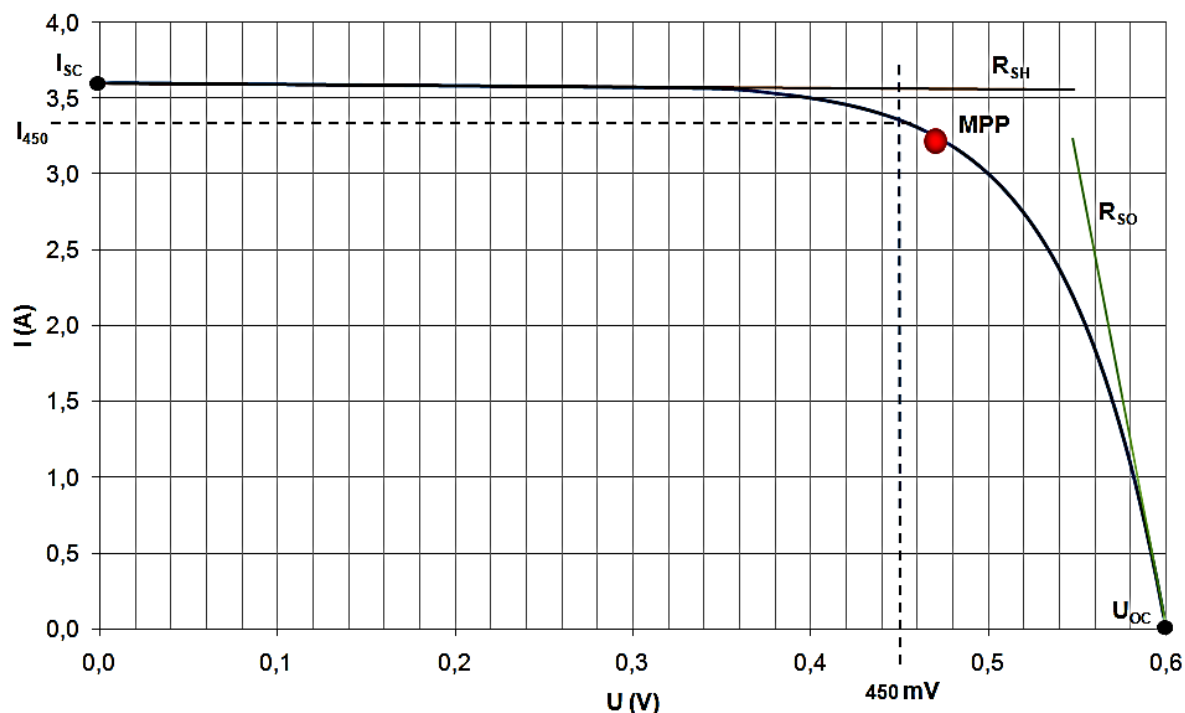
Výroba krystalických křemíkových článků prochází obdobím prudkého snižování energetické náročnosti. Zároveň se snižuje spotřeba materiálů a vedlejší produkty výroby jsou dle možností

recyklovány. Při použití dostupných výrobních technologií lze dosáhnout v podmínkách České republiky energetické návratnosti kratší než 2 roky. [13]

3.5 Charakteristické veličiny pro FVE

Některé parametry fotočlánků jsou uváděny v katalogových listech a některé je třeba získat měřením nebo modelováním V Ach z dostupných údajů.

Parametry FVČ se popisují voltampérovou charakteristikou (V Ach), která udává závislost proudu na napětí. Tato V Ach má definované význačné body - parametry, které se používají při posuzování kvality fotočlánků a při návrzích FVS a zařízení.



obr. 3.7 Voltampérová charakteristika obecného fotovoltaiického článku [14]

Proud nakrátko – I_{sc} (Short Circuit), fotoelektrický proud – I_L

Proud nakrátko neboli také fotoelektrický proud je charakteristickou hodnotou V Ach, která bývá zpravidla vždy uváděna, nebo ji lze pohodlně odečíst z V Ach. Proud nakrátko je jinak nazýván také fotoelektrickým proudem. Je to ve své fyzikální podstatě maximální proud, který může fotovoltaiický článek při daném slunečním osvětlení dodávat. Velikost proudu nakrátko se pohybuje řádově v desítkách mA až jednotek A. Největší běžně dostupné FVČ mají při plném ozáření proud nakrátko nad hranicí 6 A. Proud nakrátko lze měřit pouze speciálním přístrojem. Běžné ampérmetry mívají vnitřní odpor přibližně 100 m Ω . Při měření proudu nakrátko takovýmto ampérmetrem vzniká na elektrodách FVČ napětí kolem 300 mV.

Napětí naprázdno – U_{oc} (Open Circuit)

Napětí naprázdno je další charakteristickou hodnotou V_{ACh} , stejně jako je proud nakrátko. Toto napětí je ve své fyzikální podstatě napětím, které je na svorkách FVČ bez připojené zátěže. Toto napětí je maximálním napětím fotočlánku při dané teplotě a intenzitě osvětlení. U monokrystalických článků se toto napětí pohybuje na hranici 0,6 V.

Pracovní bod – PB

Pracovní bod FVČ je bod na V_{ACh} , ve kterém FVČ momentálně pracuje. Poloha pracovního bodu je závislá na vlastnostech spotřebiče. Zpravidla se požaduje, aby byla poloha pracovního bodu totožná s polohou MPP (viz dále). Leží-li pracovní bod v režimu nakrátko nebo naprázdno neodevzdává FVČ žádný výkon.

MPP – Maximum Power Point

MPP je bod na V_{ACh} s maximálním výkonem. Typické solární články (velikost 100 x 100 mm) dosahují maximálního výkonu od 1,5 do 3 W. Bod *MPP* se udává prostřednictvím napěťové a proudové souřadnice na V_{ACh} ; tyto souřadnice mají index *m*.

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} \quad (3.1)$$

P_m max. výkon, který může článek dodávat (bod P_m FVČ je na V_{ACh}

zhruba uprostřed ohybu V_{ACh})

U_m napětí, při kterém dodává FVČ P_m

I_m proud, při kterém dodává FVČ P_m

R_m vnitřní odpor FVČ, při kterém dodává FVČ P_m

FF – Fill Factor

Parametr *FF* udává poměr mezi maximálním výkonem a výkonem daným napětím naprázdno a proudem nakrátko. Je závislý na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a odporu aktivní polovodivé vrstvy. Tento poměr se uvádí jako tzv. činitel naplnění a je definován následujícím vztahem:

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{OC} \cdot I_{SC}} = \eta_{el} \quad (3.2)$$

Porovnání velikosti veličin v uvedeném vztahu pro FF vede k závěru, že tento činitel v ideálním případě dosahuje hodnoty 1 (MPP je pak dáno proudem nakrátko a napětím naprázdno). V reálném případě je samozřejmě FF menší. Podle jeho velikosti lze posoudit, jak kvalitní je příslušný FVČ. Čím je jeho hodnota větší, tím větší výkon je schopen do zátěže dodat.

Účinnost fotovoltaického článku – EEF

Účinnost přeměny slunečního záření FVČ je dána vlastnostmi materiálu, ze kterého je FVČ vyroben. Tento materiál ovlivňuje spektrální citlivost FVČ na dopadající záření tzn., že FVČ využívá energii různých vlnových délek s různou účinností. Monokrystalické články mají účinnost zpravidla v rozsahu 15 až 18 %, polykrystalické v rozsahu 13 až 16 %. Účinnost FVČ je definována následujícím vztahem:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{P_m}{E \cdot A_c} \quad (3.3)$$

P_m max. výkon, který může článek dodávat (bod P_m FVČ je na VAch zhruba uprostřed ohybu VAch)

P_{rad} výkon dopadajícího záření

E intenzita osvětlení (ozáření) při standardizovaných zkušebních podmínkách ($W \cdot m^{-2}$)

A_c plocha FVČ (m^2)

Účinnost převodu můžeme také vyjádřit pomocí dílčích účinností:

$$\eta = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_P \cdot \eta_{el} = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_P \cdot FF \quad (3.4)$$

η_r poměr výkonu odraženého záření k výkonu dopadajícímu, s respektováním průměrné odrazivosti křemíku ($R = 0,3$), můžeme pro tento poměr psát:

$$\eta_r = \frac{P_{abs}}{P_{rad}} = 0,70 \quad (3.5)$$

η_e účinnost Carnotova tepelného cyklu:

$$\eta_e = 1 - \frac{T}{T_s} = 0,95; T = 300K; T_s = 6000K \quad (3.6)$$

T teplota okolí;

T_S teplota Slunce

η_p příspěvek k účinnosti vlivem nepříznivého působení křemíku ke spektru slunečního záření:

$$\eta_p = 0,42 \quad (3.7)$$

η_{el} příspěvek k účinnosti daný kumulativními elektronickými parametry FVČ, dostupný měřením:

$$\eta_{el} = FF = \frac{P_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{\eta \cdot A_C \cdot E}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.8)$$

Po dosazení číselných hodnot dílčích vztahů do vztahu:

$$\eta = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_P \cdot \eta_{el} = 0,7 \cdot 0,95 \cdot 0,42 \cdot FF = 0,2973 \cdot FF \quad (3.9)$$

Ze vztahu je zřejmé, že maximální teoretická účinnost je přibližně 30 %. Jak již bylo výše uvedeno, je účinnost článků závislá především na materiálu FVČ. Hranice teoretické účinnosti se s vývojem nových materiálů a technologií postupně zvyšuje. Při stanovení účinnosti v podmínkách ČR, lze vycházet z předpokladu, že na 1 m² sluncem ozářené plochy, dopadá v našich podmínkách za každou 1 s přibližně 750 J zářivé energie.

PR – Performance ratio

Performance ratio je měřítkem kvality fotovoltaických elektráren, který je nezávislý na umístění a je často popisován jako faktor kvality. Uvádí se v procentech a popisuje vztah mezi skutečným a teoretickým výstupem energie z fotovoltaického systému. Znázorňuje podíl energie, která je skutečně k dispozici pro dodávku do sítě nebo akumulátorů po odečtení ztrát a spotřeby energie pro vlastní provoz. Čím je hodnota PR blíže 100%, tím je systém efektivnější. Ovšem v reálné situaci tento případ nikdy nastat nemůže, jelikož vznikají nevyhnutelné ztráty v podobě ztrát tepelných, ve vodičích, na střídačích, aj. Nejvyšší dosahovaná hodnota se pohybuje mezi 60% až 80%.

PR je veličina informativního charakteru informující o spolehlivosti a účinnosti FV systému. Poskytuje možnost porovnání daného systému s ostatními systémy či sledovat jeho stav. Pokud je stanovena výchozí hodnota rozmezí PR, pak lze postupem času pravidelně kontrolovat systém a jeho

odchylky od výchozí hodnoty. V případě, že se vyskytne výrazná odchylka pod výchozí hodnotou, systém naznačuje možnou závadu na systému, která může být odstraněna již v raném stádiu.

$$PR = P_N \cdot \left[\frac{W_{dodaná}}{\frac{W}{P}} \right] \quad (3.10)$$

PR značí Performance ratio v procentech, P_N instalovaný výkon zdroje (kW), $W_{dodaná}$, energie kterou systém dodal do sítě nebo akumulátorů (kW·h), W je energie dopadající na povrch systému (kW·h·m⁻²) a P vyjadřuje úhrn slunečního záření (W·m⁻²), v našich podmínkách rovno 1000 (W·m⁻²).

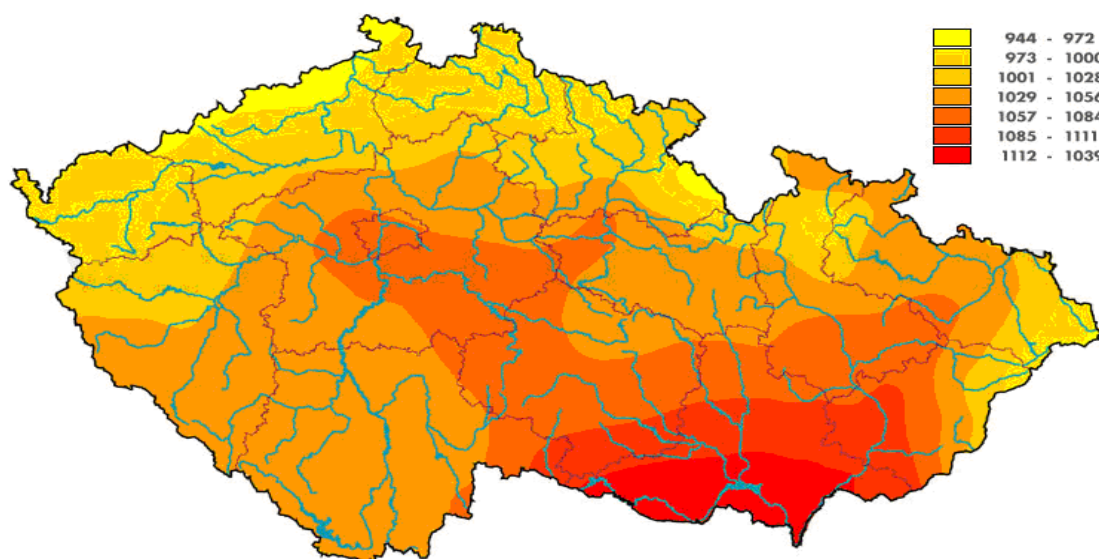
Vlivy na parametry FVČ

Největší vliv na výkon FVČ má intenzita ozáření. Tato skutečnost je dána fyzikální podstatou přeměny dopadajícího světelného záření na elektrickou energii; platí tedy: čím větší intenzita ozáření – tím větší generovaný proud FVČ (fotoproud). Opačný vliv na vlastnosti FVČ má teplota. Zatímco proud s rostoucí teplotou roste, napětí a tím pádem výkon klesá. Typická změna výkonu je dána:

$$\frac{\partial P}{\partial \vartheta} \cong \frac{\Delta P}{\Delta \vartheta} = -0,4 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \quad (3.11)$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že při změnách teploty o 10 °C dojde ke změně výkonu o 4 %. Při změně teploty o 25 °C dojde ke změně výkonu až o 10 %. Výkon FVČ je dále ovlivněn spektrální citlivostí na dopadající záření, která je závislá na použitém materiálu FVČ. Aby bylo možné navzájem porovnávat výkon FVČ, dohodli se vědci a výrobci na standardních zkušebních podmínkách STC (Standart Test Conditions). Měření výkonu se provádí při ozáření 1000 W·m⁻² (přibližně plné sluneční ozáření) při teplotě FVČ 25 °C a veličině AM = 1,5 (Air Mass; AM 1,5 znamená, že složení světla odpovídá slunečnímu světlu po průchodu 1,5 násobnou tloušťkou zemské atmosféry filtrující světlo). Výkon změřený při těchto podmínkách se nazývá špičkovým výkonem s jednotkou (W_p) [14]

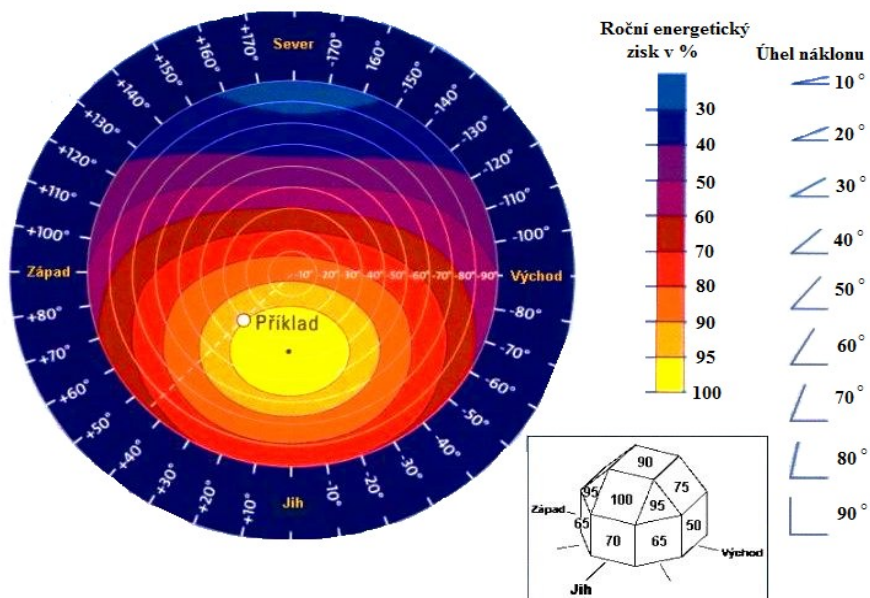
3.6 Situace v ČR



obr. 3.8 Roční průměrný úhrn slunečního záření ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$) [15]

Z mapy pro roční průměrný úhrn slunečního záření ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$) z obr. 3.8 je patrné, že nejnižší intenzita slunečního záření v České republice, je na jejím severu až severozápadě, kdežto nejvyšší a tudíž i nejlepší podmínky pro výstavbu fotovoltaických elektráren jsou na jižní Moravě.

Volba umístění



obr. 3.9 vliv sklonu a orientace FV modulů [16]

Na obrázku obr. 3.9 je zobrazena mapa využitelnosti slunečního záření na náklonu panelů ve stupních a na orientaci panelů na světové straně.

4 Vítr

4.1 Historie využití větru

Větrnou energii používá lidstvo od dávnověku. Vítr poháněl plachetnice, větrné mlýny, vodní čerpadla. S větrnými motory se setkáváme už ve starověké Číně. Ve větrných mlýnech se větrná energie využívala v minulosti i na území našeho státu. Historicky je postavení prvního větrného mlýnu na území Čech, Moravy a Slezska doloženo již v roce 1277 v zahradě Strahovského kláštera v Praze. Největší rozkvět doznalo větrné mlynářství v Čechách ve 40. letech 19. století, na Moravě a ve Slezsku o něco později. Celkem bylo na území dnešní ČR evidováno a je historicky ověřeno 879 větrných mlýnů. Období využívání větrných turbín pro pohon vodních čerpadel spadá u nás do prvního dvacetiletí 20. století. Začátek výroby novodobých větrných elektráren se datuje na konec 80. let minulého století. Jejich rozkvět proběhl v letech 1990-1995, od té doby stagnuje (29 % ze všech 24 větrných elektráren postavených do roku 1995 patřilo do skupiny s nevyhovující nebo vysoce poruchovou technologií, 21 % těchto zařízení bylo vybudováno v lokalitách s nedostatečnou zásobou větrné energie).

V současné době větrné elektrárny pracují na desítky lokalit v ČR, jejich nominální výkon se pohybuje od malých výkonů (300 W) pro soukromé využití až po 2 MW. Mezi výrobce patří několik českých firem, u velkých výkonů to jsou především dodavatelé z Německa.

K rozvoji větrných elektráren v evropském i světovém měřítku dochází od konce 20. století, průkopnické instalace se uskutečnily v Dánsku a v USA. [17]

4.2 Vznik větru

Zemský větrný systém je zapříčiněn pohybem hmot atmosférického vzduchu v důsledku změny atmosférického tlaku, což je výsledkem rozdílů solárního ohřevu různých částí zemského povrchu.

Na jeden metr čtvereční zemského povrchu v blízkosti rovníku dopadá více slunečního záření za rok než jeden čtverečný metr ve vyšších zeměpisných šířkách. To je způsobeno zakřivením Země, to znamená, že na její povrch dopadají sluneční paprsky pod jiným úhlem s rostoucí zeměpisnou šířkou. Kromě toho musejí sluneční paprsky urazit větší vzdálenost se zvyšující se zeměpisnou šířkou, takže více sluneční energie je absorbováno na cestě před tím, než dosáhne povrchu. V důsledku těchto účinků jsou v tropech podstatně vyšší teploty než v regionech jiných zeměpisných šířek. Zjednodušené vysvětlení, jakým způsobem tento rozdíl oteplování vytváří zemský větrný systém, je uvedeno v následující kapitole.

Atmosférický tlak, též zvaný barometrický je aerostatický tlak způsoben atmosférou planety Země. Tento tlak je vyvolán tíhou vzduchového sloupce sahajícího od hladiny (nadmořské výšky, ve které se tlak zjišťuje) až po horní hranici atmosféry. Hodnota tohoto tlaku je největší na zemském povrchu a s rostoucí výškou klesá.

Atmosférický tlak je definován jako přibližně průměrná hodnota tlaku vzduchu při mořské hladině na 45° s.š., při teplotě 15 °C a tíhovém zrychlení $g_n = 9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

V meteorologii se atmosférický tlak vyjadřuje nejčastěji jednotkou hektopascal (*hPa*). Při použití rtuťových barometrů se stále užívá jednotka torr (milimetr rtuťového sloupce), která se dále přepočítává na hektopascal.

$$p_n = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1013,25 \text{ hPa} = 760 \text{ torr} \quad (4.1)$$

Barometrický tlak není stálý, ale kolísá v daném bodě zemského povrchu kolem určité hodnoty. Jednotkou atmosférického tlaku je bar, jeden bar je přibližně normální atmosférický tlak u hladiny moře. Tlak menší než barometrický tlak se nazývá podtlak, tlak větší než barometrický tlak se nazývá přetlak. Prostor s takřka nulovým tlakem se nazývá vakuum. [6]

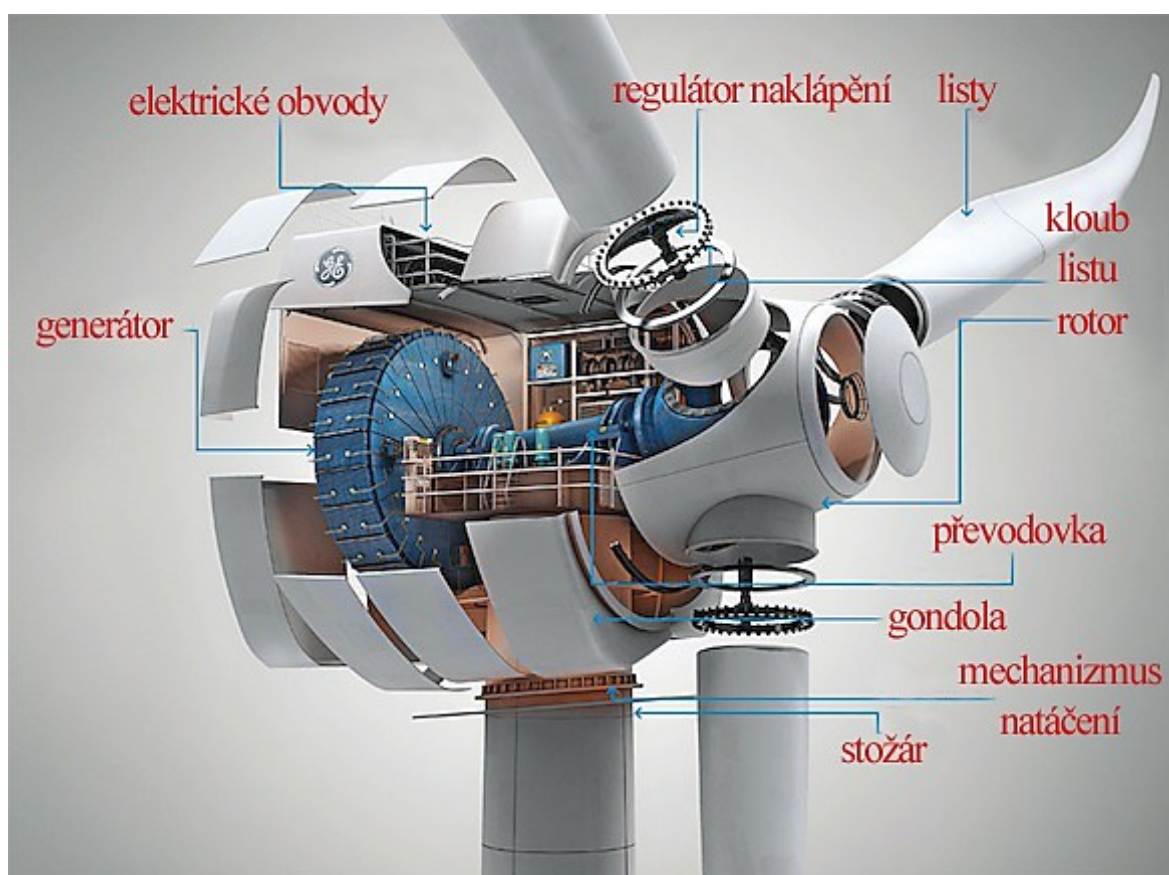
4.2.1 Beaufortova stupnice síly větru

Beaufortova stupnice byla vytvořena počátkem 19. století kontradmirálem Francisem Beaufortem. Slouží k odhadu rychlosti větru podle jeho snadno pozorovatelných projevů na moři či souši. Beaufortova stupnice má dvanáct stupňů.

Beaufortovu stupnici „pro moře“ vytvořil kontradmirál britského námořnictva irského původu sir Francis Beaufort v roce 1805. Původně nesloužila pouze k odhadu rychlosti větru, ale byla dvanáctibodovou škálou vztahující se k vhodnosti pro plavbu s určitým počtem plachet. Pro nenámořní použití byla upravena v roce 1850, kdy byla též přibližně určena rychlost větru u různých stupňů pomocí anemometru. Standardizována byla v roce 1923. Od roku 1969 se vyskytuje i v 16 stupňové podobě, když byla nastavena o 5 stupňovou Saffir-Simpsonovu stupnici hurikánů (SSSH). První stupeň SSSH je v takovémto případě roven 12 stupni BS, 2. stupeň SSSH odpovídá 13. stupni BS a tak dále. Beaufortova stupnice síly větru je uvedena v příloze č. I. [18]

4.3 Princip větrné elektrárny

Působením aerodynamických sil na listy rotoru převádí větrná turbína umístěná na stožáru energii větru na rotační energii mechanickou. Ta je poté prostřednictvím generátoru zdrojem elektrické energie. Podél rotorových listů vznikají aerodynamické síly; listy proto musejí mít speciálně tvarovaný profil, velmi podobný profilu křídel letadla. Se vzrůstající rychlostí vzdušného proudu rostou vztahové síly s druhou mocninou, kdežto rychlosti větru a energie vyprodukovaná generátorem s třetí mocninou. Je proto třeba zajistit efektivní a rychle pracující regulaci výkonu rotoru tak, aby se zabránilo mechanickému a elektrickému přetížení větrné elektrárny. Otáčky rotoru zpomaluje tření mechanických součástí a vzdušné víry za lopatkami. Konce lopatek se pohybují rychleji než středové části a výsledná účinnost tedy závisí také na součiniteli rychloběžnosti, což je poměr rychlosti otáčení lopatek a rychlosti větru. Součinitel rychloběžnosti se zvyšuje snížením počtu lopatek. Současné větrné turbíny mívají 1 - 3 lopatky, nejlepší dosahovaná účinnost je 45 %.



obr. 4.1 řez větrnou elektrárnou [19]

4.3.1 Konstrukce a technické podmínky

Tubus elektrárny musí být dostatečně vysoký, aby vynesl větrnou turbínu nad přízemní pásmo větrných turbulencí, a dostatečně silný, aby odolal hmotnosti celého soustrojí. Hlavice (gondola) obsahuje převodovou skříň - rychlost otáček vrtule 30 až 50 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$, není dostatečná pro výrobu elektrické energie, musí se proto pro pohon elektrického generátoru zpřevodovat na více než 1500 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Dále obsahuje generátor, ložiska a systém natáčení. Mezi gondolou a tubusem je nainstalováno tlumení, které zabraňuje přenosu vibrací. „Energeticky“ využitelný je vítr o rychlosti 4 až 26 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (tj. 15 až 95 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$). Pomocí fyzikálních rovnic lze vypočítat, že získaný výkon je úměrný třetí mocnině rychlosti větru. Při větším větru než 26 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ se musí elektrárna zastavit, protože dochází k rozkmitání konstrukce. V takovém případě se rotor zabrzdí a lopatky se postaví vůči větru nejužším profilem. U velkých větrných turbín se konce lopatek pohybují rychlostmi většími než rychlost zvuku - vznikají přitom různé doprovodné zvukové efekty. U vrtule s rozpětím kolem 100 m také činí problémy rozdíl v rychlosti větru v různých výškách, který může být až 2,8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. [20]

Základní části větrné elektrárny

Větrná elektrárna má tyto základní části:

- rotor
- generátor
- převodovka
- systém natáčení strojovny
- stožár a rám strojovny
- regulační systém

Rotor

Existují dva základní druhy větrných motorů, a to vrtule a lopatkové kolo jako představitelé větrných motorů s horizontální osou rotace.

Vrtule

Je větrný motor s nejvyšší dosažitelnou účinností. Obecně lze říci, že pro návrhový (jmenovitý) bod lze získat účinnost až 58 %. To znamená, že bude-li předpokládaná účinnost převodu mezi mechanickou energií na hřídeli rotoru a elektrickou energií na svorkách generátoru 80 %, pak celková účinnost větrné elektrárny vybavené tímto druhem větrného motoru mezi 40 % až 45 %. Vrtule je rychloběžný typ větrného motoru, tzn., že její rychloběžnost (poměr obvodové rychlosti

špiček listů rotoru a rychlosti větru) může dosahovat hodnoty až kolem 10. Obecně však platí, že maximální účinnosti dosahuje větrný motor při rychloběžnosti rovnající se přibližně 6. Počet listů rychloběžné vrtule bývá 1 až 4 s tím, že nejrozšířenější jsou zařízení se dvěma či třemi listy.

Lopátkové kolo

Je pomaloběžný větrný motor, používaný od poslední čtvrtiny minulého století. Obvyklý počet lopatek se pohybuje mezi 12 a 24. Běžný průměr lopátkového kola je 5 až 8 metrů. Na rozdíl od rychloběžného motoru je maximální účinnosti dosahováno při rychloběžnosti 1.

Převodovka

Převodovky se používají u větrných elektráren, u nichž je velký rozdíl mezi jmenovitými otáčkami rotoru a generátoru. Obvykle se používají několikastupňové převodovky, na jejichž těleso je přímo připojena brzda.

Generátor

Generátory u větrných elektráren je možné rozdělit do tří skupin:

- a) stejnosměrné generátory
- b) synchronní generátory klasické a s permanentními magnety
- c) asynchronní generátory

Pro malé větrné elektrárny se většinou používají stejnosměrné generátory vhodné pro dobíjení akumulátorů, popř. střídavé generátory (obvykle s permanentními magnety) s vhodným typem usměrňovače, který je v dnešní době levný a jednoduchý.

Ve větrných elektrárnách středních a větších výkonů se používají synchronní a asynchronní generátory. Výhodou synchronních generátorů je velká účinnost a použitelnost pro široký rozsah rychlostí větru. V porovnání s asynchronními generátory jsou však mnohem dražší a vyžadují komplikovaný řídicí a kontrolní systém, který je schopen snímat otáčky, napětí, fázový posun, okamžik připojení k síti a odpojení od sítě. Synchronní generátor je totiž nutné připojit k elektrorozvodné síti za jistých podmínek. Asynchronní generátory mají oproti synchronním některé výhody, jako např.:

- a) levnější konstrukci
- b) žádné rotující kontakty, kartáče apod.
- c) velmi snadné připojení k síti

Připojovací systém asynchronního generátoru je velmi jednoduchý a sestává pouze ze zařízení, které hlídá otáčky a rozhoduje o okamžiku připojení k síti.

Nevýhodou, i když ne příliš výraznou, je, že odebírá ze sítě jalový proud. Tuto skutečnost lze obvykle kompenzovat použitím baterie kondenzátorů. Navíc výhodou asynchronního generátoru je, že jej lze použít v motorickém režimu pro rozběh celého soustrojí. To se velmi často používá u rychloběžných elektráren, jejichž rozběhový moment je malý. [20], [21]

4.4 Rozdělení větrných elektráren

tab. 4.1 rozdělení větrných elektráren podle Endera [22]

Větrné elektrárny								
Malé			Střední			Velké		
Větrný motor		Výkon do (kW)	Větrný motor		Výkon do (kW)	Větrný motor		Výkon do (kW)
Průměr (m)	Plocha (m ²)		Průměr (m)	Plocha (m ²)		Průměr (m)	Plocha (m ²)	
< 8	< 50	10	16,1-22	200,1-400	130	45,1-64	1600,1-3200	1500
8,1-11	50,1-100	25	22,1-32	400,1-800	310	64,1-90	3200,1-6400	3100
11,1-16	100,1-200	60	32,1-45	800,1-1600	750	90,1-128	6400,1-12800	6400

U rozdělení podle Endera jsou větrných elektráren děleny do tří kategorií. A každá kategorie má tři kritéria, podle kterých se posuzuje velikost větrné elektrárny.

4.5 Větrná mapa

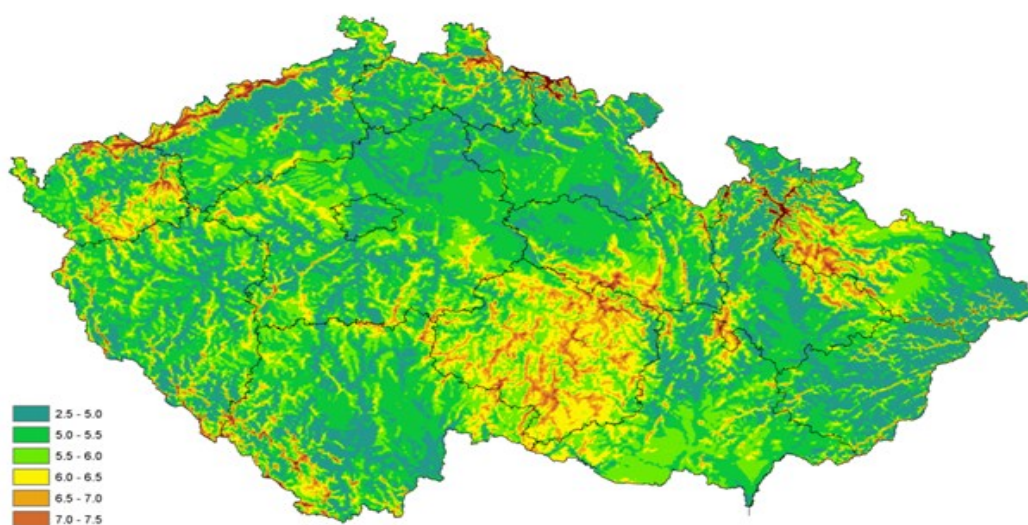
Prvním a klíčovým krokem pro správné určení potenciálu větrné energie je zjištění reálných větrných podmínek. Za tímto účelem jsou vytvářeny tzv. větrné mapy (mapy větru), jako výstupy plošných výpočtů parametrů větru. V minulosti již bylo vytvořeno několik generací větrných map odpovídajících postupnému zlepšování výpočetních možností, zdokonalování použitých modelů, získávání nových zkušeností a rozšiřování spektra dostupných meteorologických dat. Dosavadní

větrné mapy byly vztahovány převážně k výšce 10 m nad zemským povrchem (nejvýše 40 m), což je z hlediska současných větrných elektráren nedostatečná výška.

Byla proto vytvořena nová větrná mapa České republiky, vztažená k typické výšce osy rotoru nyní plánovaných větrných elektráren 100 m nad zemským povrchem. Pro výpočet byla použita kombinace tří modelů dlouhodobě používaných na Ústavu fyziky atmosféry AV ČR - VAS, WAsP a PIAF. Nejprve byly zkombinovány modely VAS a WAsP do takzvaného hybridního modelu VAS/WAsP, jehož výsledek byl váženým průměrem sečten s výsledkem modelu PIAF.

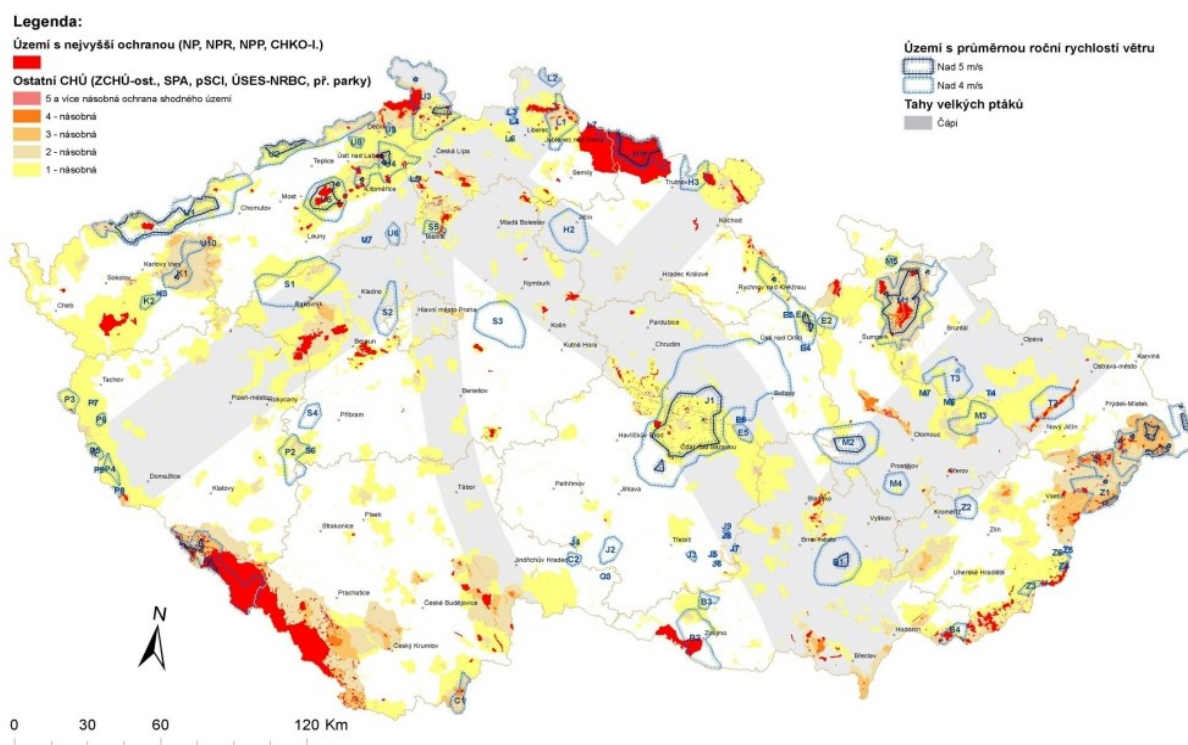
Značná pozornost byla věnována výběru a vyhodnocení vstupních meteorologických dat. Právě pochybná přesnost některých měření a nedostatečné zohlednění místních podmínek na naměřené hodnoty jsou nejběžnější příčinou chybných výsledků, což mělo v minulosti často za následek podhodnocení či nereálnou prostorovou strukturu odhadovaného větrného potenciálu. Proto byla použita pouze prověřená a kvalitní měření, přičemž byl velký důraz kladen na vyhodnocení vlivu okolního terénu a blízkých překážek.

Nejprve byla vymezena území, kde dostatečná rychlost větru umožňuje ekonomicky rentabilní výstavbu větrných elektráren. Hranice rentability byla pro typické podmínky v České republice uvažována na úrovni $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ve výšce 100 m nad zemí, což je v souladu s předpoklady vyhlášky ERÚ č. 475/2005. Na rozdíl od dosavadních přístupů tato hranice nebyla používána jednotně na celém území ČR. Limitní hodnota $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byla přiřazena typické lokalitě nacházející se v otevřené krajině ve středních polohách (ve výšce kolem 500 m n. m.) a v závislosti na konkrétních místních podmínkách byla modifikována. V první řadě byl zohledněn vliv nadmořské výšky, kdy obecně platí, že ve větších nadmořských výškách je pro rentabilní výstavbu větrných elektráren nutná vyšší průměrná rychlost větru.



obr. 4.2 Pole průměrné rychlosti větru ve výšce 100m nad povrchem [23]

Takto získaná území s dostatečným větrným potenciálem byla konfrontována s hlavními omezeními vyplývajícími z české legislativy. Jako nevhodná pro výstavbu větrných elektráren byla vymezena území sídel včetně jejich okolí do vzdálenosti 500 m, dále zvláště chráněná území (Národní parky, CHKO, (Národní) přírodní rezervace a památky), vojenské újezdy, okolí hlavních letišť a ochranná pásma kolem dopravních komunikací a páteřní energetické infrastruktury. Jako podmíněně vhodná pak byla označena území přírodních parků, chráněných území soustavy Natura 2000 (ptačí oblasti a evropsky významné lokality) a plochy lesních porostů. Zde nelze výstavbu zcela vyloučit, avšak lze očekávat její významné omezení. Mapa s vhodnými územími je zobrazena na *obr. 4.3* [23]



obr. 4.3 území vhodná pro umístění větrných elektráren[24]

4.6 Charakteristické veličiny pro větrnou elektrárnu

Proudící vzduch předává lopatkám větrné elektrárny část své kinetické energie. Albert Betz v roce 1919 odvodil teoreticky maximální dosažitelnou účinnost větrného stroje na 59% (Betzovo pravidlo). Kinetická energie větru se v turbíně mění na energii otáčivého pohybu a následně v generátoru na energii elektrickou. Teoreticky dosažitelný výkon činí v případě jednotkové plochy

$$P_t = k_B \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \quad (4.2)$$

, kde P_t je teoreticky dosažitelný výkon, k_B je Betzův koeficient 0,59, ρ je hustota vzduchu $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, v označuje rychlost větru před větrným zařízením $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Pro reálné turbíny s průměrem rotoru D (tedy délkou lopatky $D/2$) se používá vzorec

$$P = c_P \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (4.3)$$

, kde c_P je součinitel výkonnosti, v ideálním případě rovný 0,59

$$c_P = \frac{P_m}{A \cdot \rho \cdot \frac{v_1^3}{2}} \quad (4.4)$$

, kde P_m je mechanický výkon zařízení, A je plocha kruhu, kde se otáčí lopatky vrtule v m^2

Činitel rychloběžnosti λ je podíl rychlosti koncového bodu vrtule a rychlosti větru.

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n}{v_1} = \frac{v_a}{v_1} \quad (4.5)$$

, kde λ je činitel rychloběžnosti, R poloměr vrtule (m), n otáčky vrtule (s^{-1}), v_1 rychlost větru před větrným zařízením ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a v_a rychlost pohybu špičky vrtule ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Účinnost

Součinitel výkonnosti je sám o sobě funkcí rychlosti větru a je dán konstrukčním řešením turbíny, konkrétně převodní křivkou úhlu natočení lopatek turbíny v závislosti na rychlosti větru. To, v kombinaci s kubickou závislostí na rychlosti větru, způsobuje pronikavou závislost skutečného výkonu na rychlosti větru (při poloviční rychlosti je výkon osminový atd.).

Další podstatnou hodnotou definující účinnost větrného zdroje je koeficient ročního využití k , definovaný jako poměr skutečně odvedeného výkonu k teoreticky možnému výkonu zdroje za rok. V českých podmínkách se k pohybuje v mezích 0,1 - 0,2, pro velmi větrné lokality dosahuje teoreticky až 0,28. Statisticky podle dat ČSÚ za rok 2008 však dosahuje koeficient ročního využití větrných elektráren v ČR pouze 15,50 %.

Koeficient ročního využití k_r , lze vyjádřit vztahem:

$$k_r = \frac{W_r}{P_i \cdot h} \quad (4.5)$$

, kde W_r je vyjadřuje roční množství vyrobené energie v $kW \cdot h$ za rok, P_i instalovaný výkon v kW a h počet hodin, které má rok. [25]

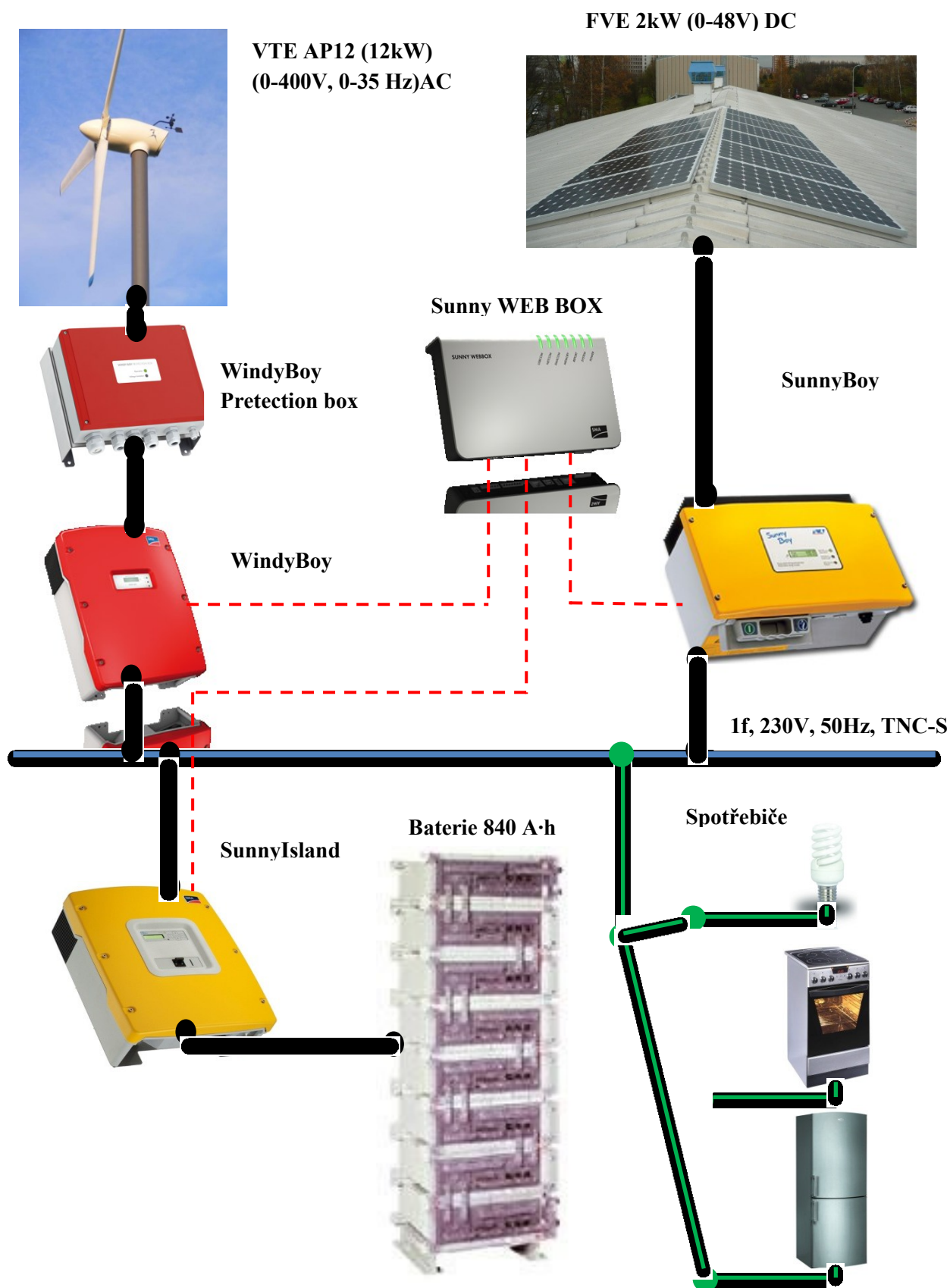
5 Hybridní systém na VŠB – TUO

Hybridní systém na VŠB TU – Ostrava byl zaslán do Studentské grantové soutěže a byl přijat oborovou komisí FEI pod číslem projektu SP/201073. Období řešení projektu bylo stanoveno od 1. ledna do 31. prosince 2010 pod názvem „*Využití hybridních obnovitelných zdrojů elektrické energie*“, jenž poskytl uplatnění třinácti členům řešitelského týmu a odpovědným řešitelem projektu byl doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.

Cílem projektu byl návrh a realizace hybridního zdroje elektrické energie pro napájení uzavřené soustavy v ostrovním režimu. Hybridním zdrojem elektrické energie je myšlena spolupráce provozu vybudované větrné a fotovoltaické elektrárny, přičemž energie zmíněných zdrojů je akumulována s využitím akumulátorových baterií, ze kterých je následně napájena uzavřená soustava spotřeby. Uzavřená soustava spotřeby je tvořena elektrickou zátěží, která simuluje běžné domácí spotřebiče. Byl tak vytvořen fyzikální model hybridního zdroje elektrické energie, s jehož využitím je následně možné simulovat různé provozní stavy větrné a fotovoltaické elektrárny a simulovat různé nároky odběru elektrické energie v ostrovním režimu soustavy bez nutnosti připojení spotřeby k distribuční soustavě.

V rámci projektu byl vytvořen monitorovací a ovládací systém, pomocí kterého bude možné ovládat formou aplikace na webovém rozhraní různé provozní režimy hybridního zdroje a taktéž sledovat časové průběhy toků výkonů mezi jednotlivými komponenty. Součástí monitorovacího a ovládacího systému je i meteorologická stanice. Pomocí systému je tedy možné sledovat formou webového rozhraní nejen časové průběhy veličin elektrických, ale i veličin meteorologických a získat tak informace o energetické využitelnosti hybridního obnovitelného zdroje elektrické energie pro různé provozní stavy a meteorologické podmínky v průběhu daného období. V roce 2009 byla v lokalitě budovy L VŠB-TU Ostrava vybudována větrná elektrárna se synchronním generátorem s permanentními magnety o celkovém výkonu 12 kW. K této větrné elektrárně byla vybudována fotovoltaická elektrárna o výkonu 2 kWp, přičemž jednotlivé fotovoltaické panely jsou umístěny na střeše budovy L VŠB-TUO.

5.1 Blokové schéma hybridního systému



obr. 5.1 blokové schéma hybridního systému

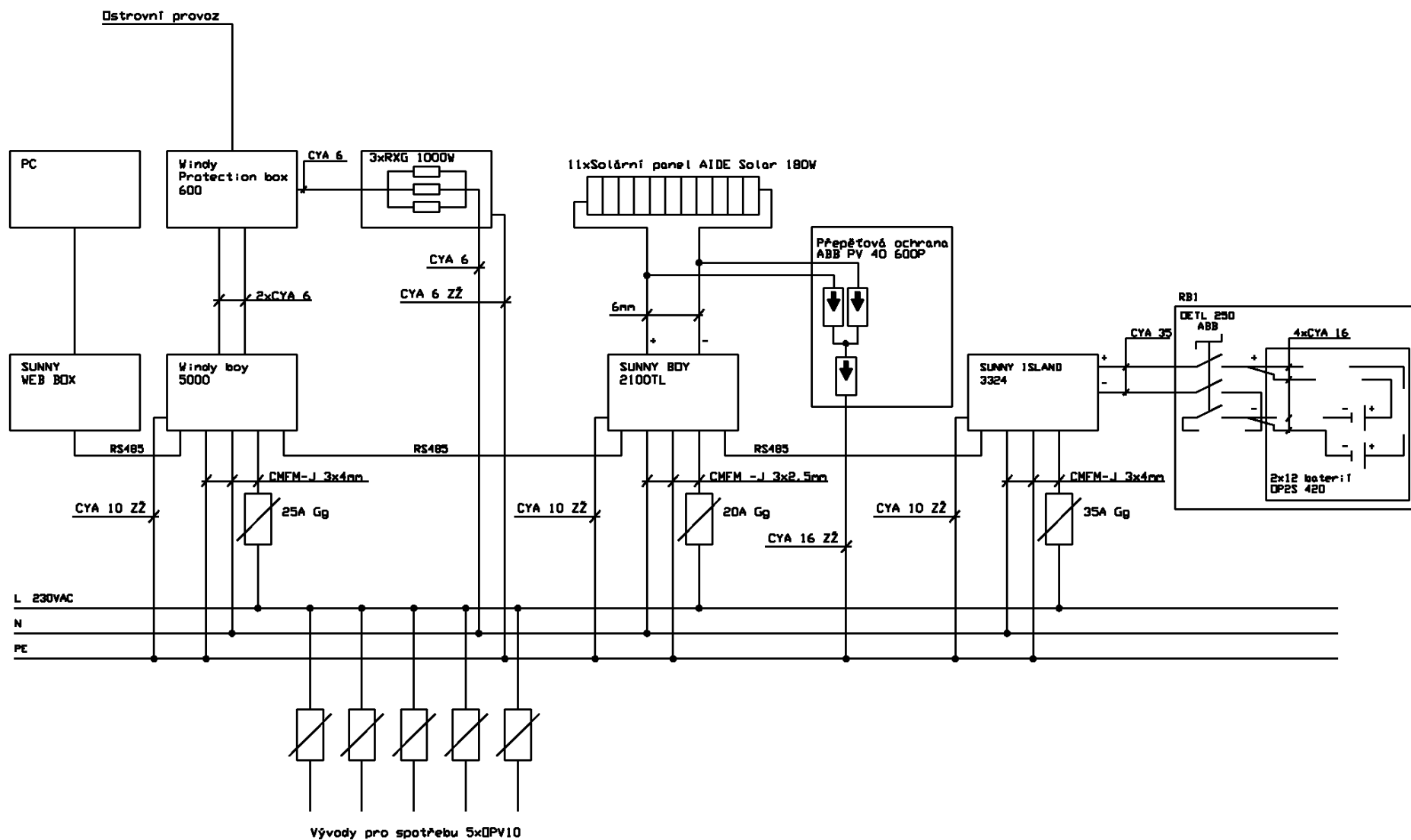
Blokové schéma uvedené na *obr. 5.1* znázorňuje zapojení jednotlivých komponentů systému, od vstupních zdrojů systému, což jsou větrná elektrárna o instalovaném výkonu 12 kW a fotovoltaická elektrárna o výkonu 2 kWp. Výstupní veličiny z větrné elektrárny jsou vedeny přes Windy Boy Protection Boxy, které plní funkci přepět'ové ochrany. Výstup z tohoto střídače je spojen se zařízením Windy Boy 5000A, jenž plní funkci střídače. Střídač Windy Boy disponuje vstupem i výstupem sériovou sběrnici RS485, jež propojuje celý systém od Sunny Island skrze Sunny Boy až po Windy Boy a následně je propojen s monitorovacím systémem Sunny WebBox, který ještě kontinuálně předává nashromážděná data do PC. Hlavní výstup tvoří 3 silové kabely, které jsou připojeny do uzavřené elektrické sítě typu TN-C-S o jmenovité hodnotě napětí 230 V.

Na střeše budovy L je umístěno 11 fotovoltaických panelů o celkovém výkonu 2 kWp. Jejich vývody jsou napojeny na střídače Sunny Boy a zároveň chrání panely samotné, a to spojením s přepět'ovou ochranou. Toto zařízení přemění stejnosměrné napětí, které produkují fotovoltaické panely, na napětí střídavé, jež je vyvedeno do stejné ostrovní elektrické sítě typu TN-C-S jako větrná elektrárna.

Třetí neméně důležitou částí hybridního systému je střídač pro ostrovní systém Sunny Island, jenž plní funkci střídače a usměrňovače. Funkci usměrňovače zajišťuje tehdy, jde-li o nabíjení akumulátorů při přebytku elektrické energie v síti, potažmo pokud kapacita baterií klesne pod stanovenou mez a k elektrické síti nejsou připojeny žádné spotřebiče. Funkci střídače plní tehdy, jestliže zdroje elektrické energie neplní svou funkci, tedy pokud nedopadá na fotovoltaické panely dostatek slunečního záření a větrnou elektrárnu neuvede do provozu její zdroj – větrná energie.

Z ostrovní elektrické sítě bylo vytvořeno pět vývodů pro různé spotřebiče tak, aby systém korespondoval se záměrem, k němuž byl určen, tedy k simulaci běžných domácích spotřebičů a zároveň k různé simulaci nároků odběru elektrické energie v ostrovním režimu soustavy bez nutnosti připojení spotřeby k distribuční soustavě.

Lepší představu o systému jako celku, včetně celkové označení kabeláže, uspořádání jednotlivých komponent a jistících prvků ilustruje *obr. 5.2*.



obr. 5.2 schéma zapojení komponentů hybridního systému v ostrovním provozu

5.2 Větrná elektrárna AP 12

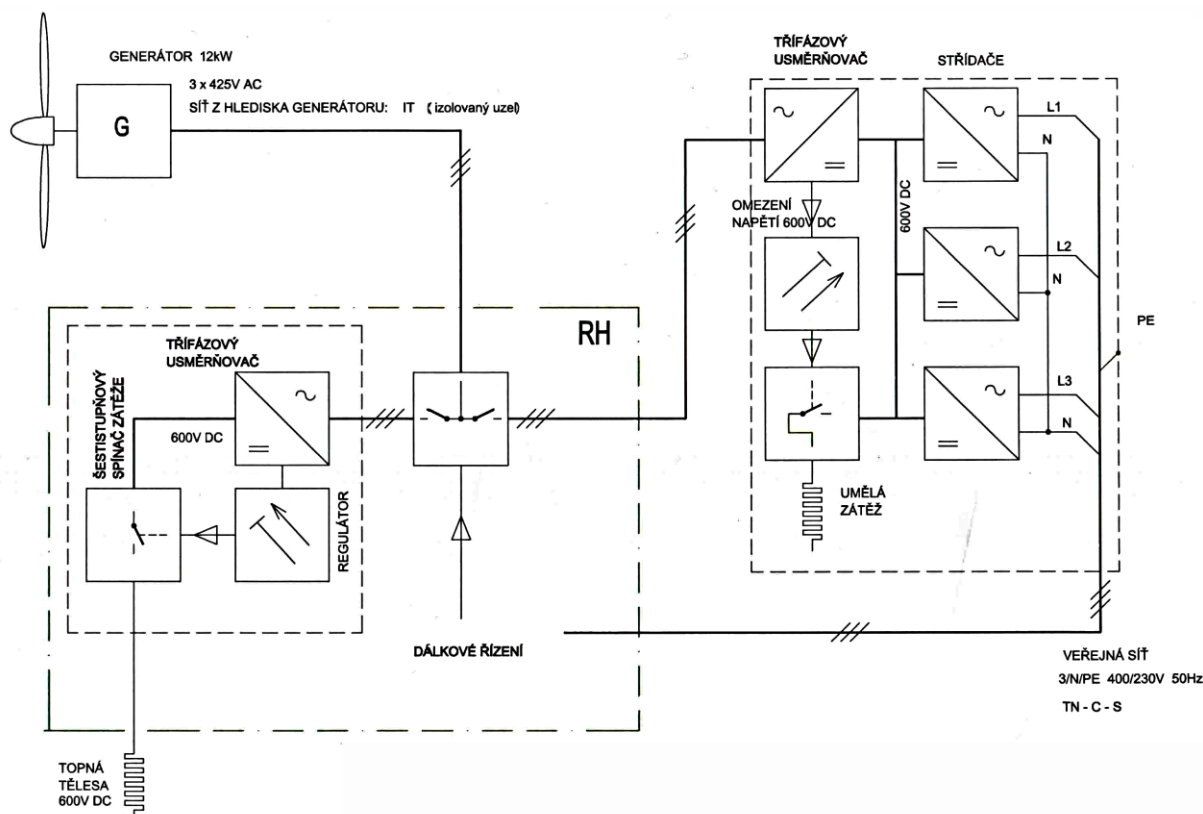


obr. 5.3 větrná elektrárna AP12[30]

Označení větrné elektrárny AP12 znamená, že poslední dvě číslice jejího označení představují instalovaný výkon generátoru v kilowattech, tedy 12 kW. Jedná se o synchronní 20ti pólový generátor 3 x 425 V s permanentními magnety typu Neodym. Výška stožáru je 16 m, na něm je upevněna gondola větrné elektrárny vážící 380 kg. Průměr větrného motoru je 8,1 m a jsou na něm upevněny 3 lopatky.



obr. 5.4 stator a rotor větrné elektrárny AP 12

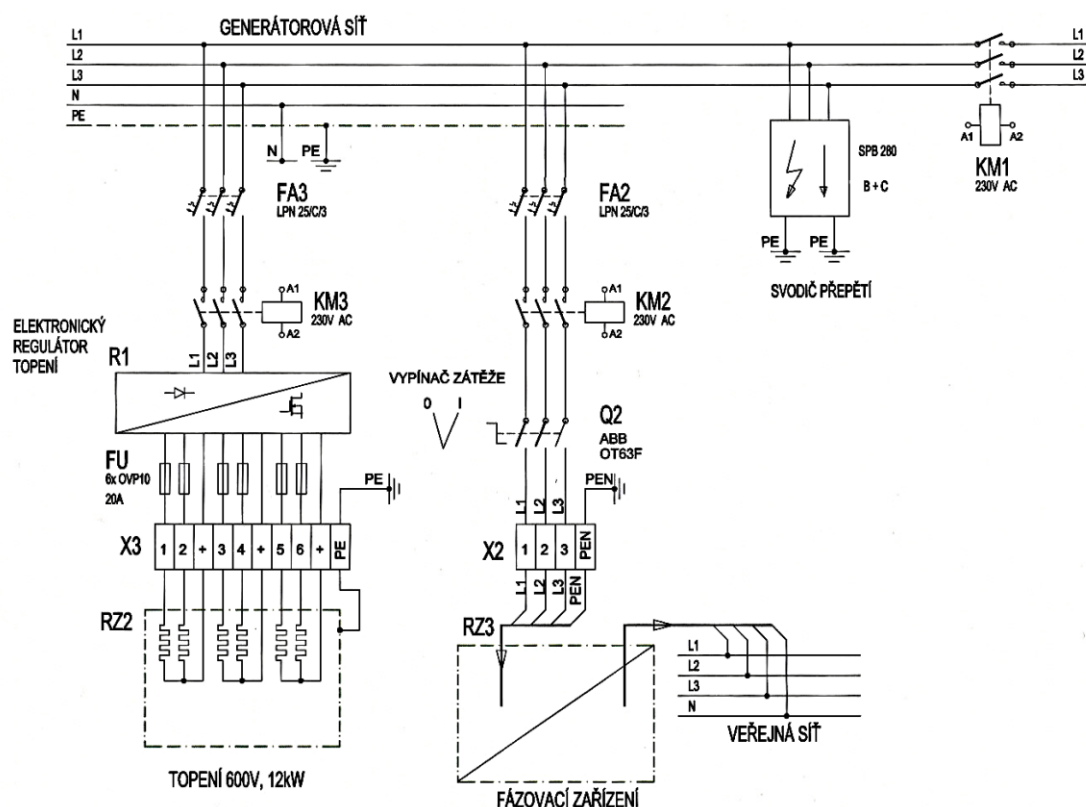


obr. 5.5 blokové schéma větrné elektrárny AP 12

Z blokového schéma větrné elektrárny AP 12 na obr. 5.5 je patrné, v jakých režimech může větrná elektrárna pracovat. Prvním režimem je chod větrné elektrárny do odporové zátěže a druhým je paralelní chod elektrárny se sítí. Modifikací prvního pracovního režimu je možné dosáhnout stavu, kvůli němuž byl hybridní systém instalován, tedy vytvoření ostrovního uzavřeného systému. Mezi velké výhody těchto režimů patří i dálkové řízení, díky kterému lze určovat jednotlivé pracovní režimy.

V režimu prvním, tedy v režimu, kdy střídavé napětí větrné elektrárny je usměrněno na hodnotu 600 V třífázovým usměrňovačem, je napájena šestistupňová spínací zátěž, jenž ovládá topná tělesa regulátorem. Pokud bude systém nastaven takto, bude to znamenat, že veškerá vyprodukovaná energie se přemění z původní energie větrné, přes elektrickou a ta bude následně využita jako energie tepelná, kterou je možno využít například pro vytápění objektu, nebo ohřev užitkové vody.

V druhém režimu, kdy je možné elektrický výkon vyvést do elektrické distribuční sítě je větrná elektrárna momentálně provozována. Střídavé napětí z generátoru je opět usměrněno třífázovým usměrňovačem na hodnotu napětí 600 V. Napětí je omezováno regulátorem a umělou zátěží z důvodů momentu, aby na všech třech fázích přivedených do usměrňovače byla stejná hodnota napětí na vstupu. Výstupní napětí z usměrňovače je přivedeno do střídačů, které se starají o to, aby jednotlivé veličiny odpovídaly parametrům sítě. V případě splnění všech těchto požadavků je výkon předáván do veřejné elektrické sítě.



obr. 5.6 schéma rozváděče RH větrné elektrárny AP 12

Řídicím systémem je programovatelný automat pro řízení technologických procesů a je napájen spínaným zdrojem. Vyhodnocovací a řídicí část zařízení je umístěna v plastové rozvodnici v místě obsluhy.

Větrná elektrárna může pracovat ve dvou pracovních režimech, jak bylo zmíněno výše. Nahrazením prvního pracovního režimu a zároveň zachováním druhého se docílí stavu chodu hybridního systému. Paralelní chod větrné elektrárny se sítí se bude využívat tehdy, pokud v daném období bude nadbytek elektrické energie, které už nebude možné akumulovat v bateriích. Zabrání se tím zbytečnému maření energie v podobě přeměny v tepelnou energii přes rezistory.

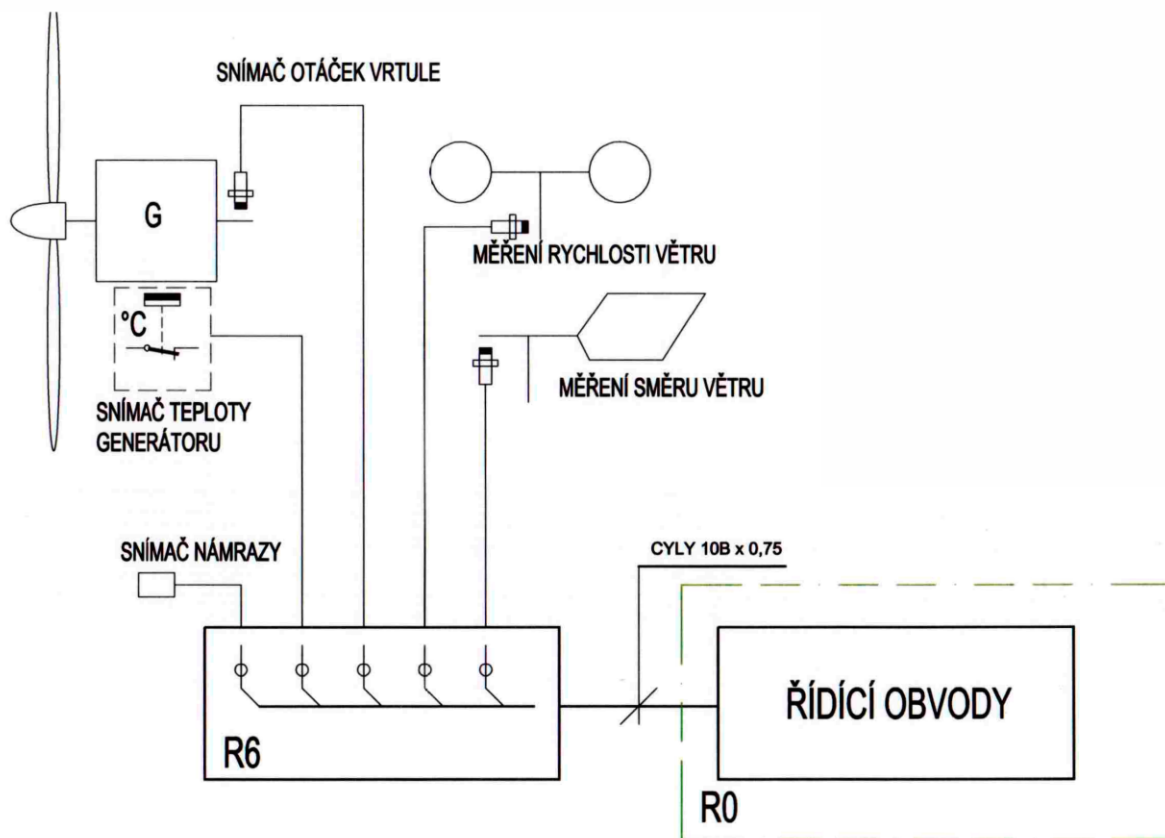
Zařízení pro ovládání větrné elektrárny se skládá ze tří částí:

- Snímačů
- Vyhodnocovací a řídicí skříň
- Akčního servopohonu

Snímače jsou umístěny na gondole elektrárny a snímají fyzikální údaje potřebné pro provoz elektrárny.

Akční servopohon je tvořen stejnosměrným komutátorovým motorem o příkonu 180 W a provozním napětím 230 V DC.

Řídicí systém za pomoci akčního servopohonu natáčí gondolu tak, aby za běžných povětrnostních podmínek byla vrtule elektrárny natočena kolmo ke směru větru a využila tak maximum potenciálu větrné energie.



obr. 5.7 snímače větrné elektrárny AP 12

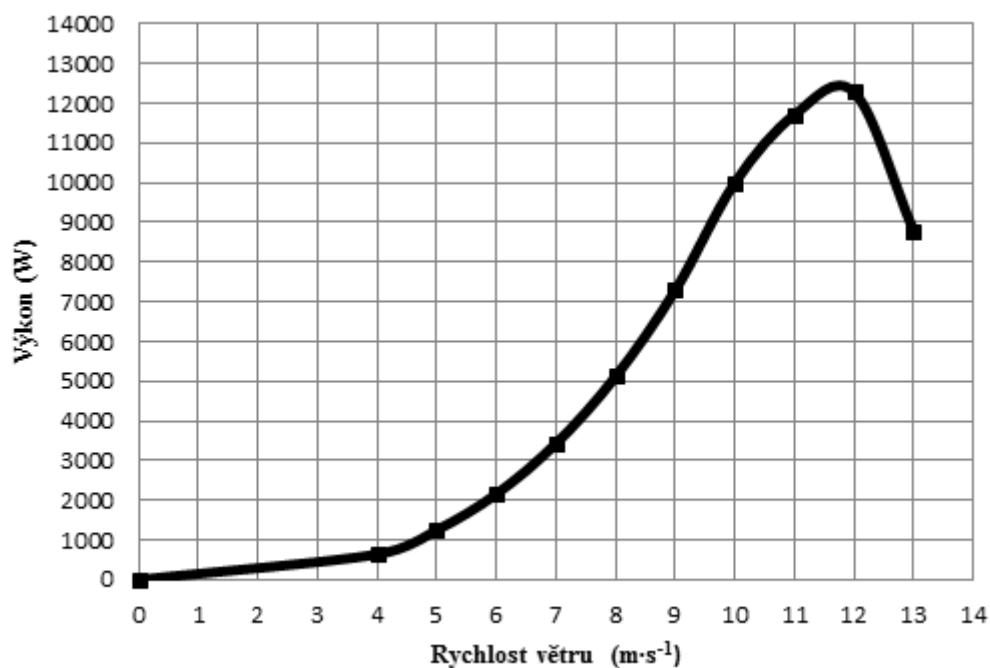
Základní funkcí řídicího systému je natáčení gondoly větrné elektrárny v závislosti na fyzikálních podmínkách a na základě povelů obsluhy. Základním údajem pro určení směru větru je výstup ze snímače směru větru. Tento snímač je tvořen větrnou korouhví, která otáčí spirálovým hliníkovým kotoučem, a dále induktivním lineárním snímačem vzdálenosti, který vyhodnocuje mezeru mezi kotoučem a snímačem. Tato vzdálenost se lineárně mění v závislosti na úhlu natočení

Řídicí systém pak pomocí akčního servopohonu otáčí gondolu tak, aby za běžných povětrnostních podmínek byla vrtule elektrárny natočena kolmo ve směru větru.

Za mimořádných povětrnostních podmínek, za které lze považovat vysokou rychlost větru nebo námrazu, působí řídicí systém automaticky odklánění vrtule z větru tak, aby nebyly překročeny mezní parametry systému.

Rychlost větru se vyhodnocuje dalším snímačem, který vysílá pulsy do řídicí jednotky v závislosti na rychlosti větru.

Řídicí systém rovněž měří otáčky vrtule, měření se provádí v intervalu jedné minuty. Pokud dojde v tomto intervalu k překročení nastavené hodnoty počtu otáček, dojde k vytočení gondoly elektrárny o 90° z větru, aby došlo k odlehčení zátěže elektrárny a nehrozilo poškození vrtule. Po jedné minutě se měření opakuje, a pokud jsou otáčky vrtule v daných mezích, gondola se automaticky natočí zpět do větru.



obr. 5.8 výkonová křivka větrné elektrárny AP12

Výkonová křivka větrné elektrárny AP 12 od dodavatele vyobrazuje průběh výkonu na měnící se rychlosti větru. Rozběhová rychlost větrné elektrárny je $3 m \cdot s^{-1}$ a dosahuje maximálního výkonu v hodnotě $12 m \cdot s^{-1}$. Křivka v rozsahu rychlostí od 3 do $12 m \cdot s^{-1}$ se dá považovat na lineární, ovšem po překročení této hranice výkon prudce klesá dolů. Rychlost větru se vyhodnocuje snímačem, který vysílá pulsy do řídicí jednotky v závislosti na rychlosti větru. Vzájemná souvislost odklonění elektrárny z větru v závislosti na jeho rychlosti je uvedena v tab. 5.1.

tab. 5.1 omezení rychlosti větru na natočení vrtule

Rychlost větru ($m \cdot s^{-1}$)	Relativní úhel natočení ($^\circ$)	Akce
0 až 3	Natáčení je blokováno	Nesleduje směr
3 až 12	0	Standardní režim
12 až 13	30	1. stupeň omezení
13 až 14	60	2. stupeň omezení
více než 14	90	Elektrárna odstavena

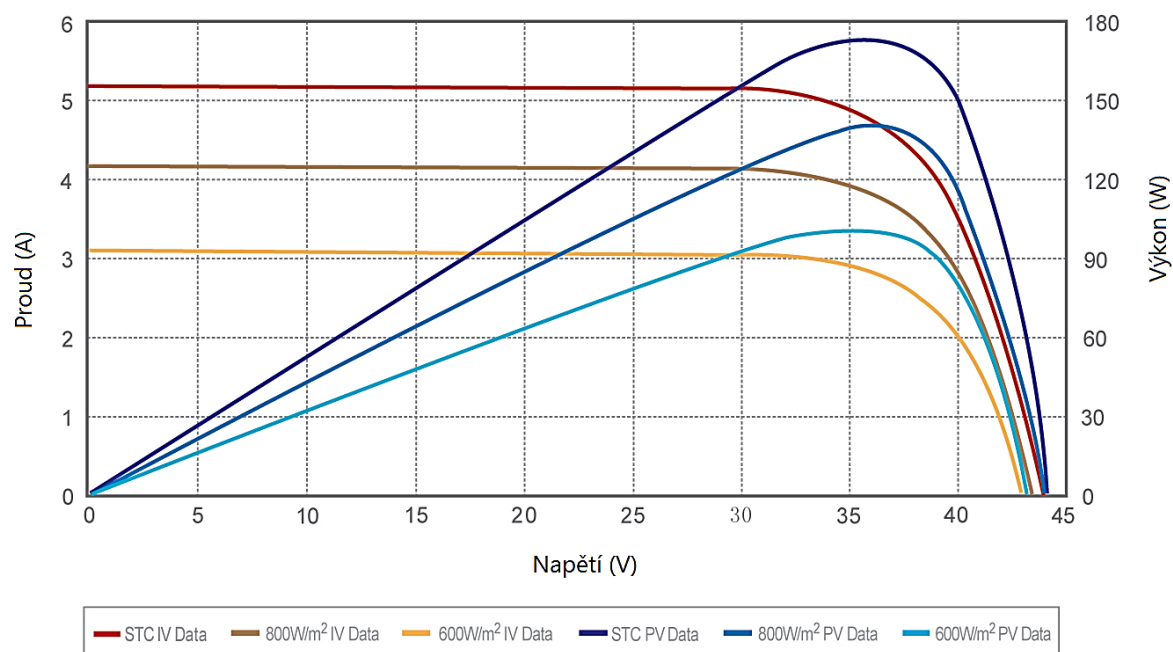
5.3 Fotovoltaické panely XZST-180W

Panely čínského výrobce jsou panely vyrobené z monokrystalického křemíku. Počet článků spojených do série je rozložen na 6 x 12 článků, čili 72 článků, s rozměry 125 x 125 mm. Společně s hliníkovým rámem tvoří fotovoltaický panel. Panel dosahuje výkonu 180 W_p a dosahuje nejvyšší účinnosti 14,1 % při STC. Technické údaje jsou uvedeny v příloze č. III.



obr. 5.9 monokrystalický fotovoltaický panel XZST-180W

Monokrystalické panely označené XZST-180W se svými rozměry 1580 x 808 x 35 mm a váhou 15 kg patří ve své kategorii mezi průměrné. Co se účinnosti týče, hodnota 14,1 % nepatří do kategorie nejlepších dosahovaných hodnot.



obr. 5.10 voltampérová charakteristika panelu XZST-180W [26]

Voltampérová charakteristika má stejnou vypovídající hodnotu jako výkonová křivka u větrné elektrárny. Jednotlivé křivky voltampérové charakteristiky znázorňují, jaký výkon je panel schopen dodávat při součinu napětí a proudu při rozdílné intenzitě slunečního záření. Křivky vycházející z nulového bodu vyjadřují závislost výkonu na napětí, proto zkratka PV (power-voltage) a jsou zvoleny pro různé hodnoty od hodnot STC ($1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) přes hodnoty 800 a $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Na obr. 5.10. je zobrazena zatěžovací charakteristika s V-A charakteristikou osvětlovaného panelu při různých intenzitách osvětlení. Průsečíky křivek se svislou osou udávají proudy nakrátko. Napětí naprázdno určují průsečíky s vodorovnou osou. Optimální zátěž pro polovodičový článek má takovou hodnotu, při které pracovní bod leží v takovém místě zatěžovací charakteristiky, v němž má součin napětí a proudu nejvyšší hodnotu. Tehdy článek dodává do obvodu maximální výkon

5.4 Střídače

Střídač, někdy znám pod názvem měnič nebo invertor slouží k přeměně stejnosměrného napětí produkované zdrojem elektrické energie na napětí střídavé shodné s napětím elektrorozvodné sítě. Střídač může být ale i vybaven celou škálou doplňkových funkcí jako např. monitoring sítě a provozních údajů, nebo ochrannou funkcí. Mezi základní faktory, kterých by si měli investoři všimnout, patří:

- Účinnost
- Rozsah MPP – uvádí rozsah napětí, při kterém by měl střídač optimálně pracovat
- Účinnost přizpůsobení MPP – rychlost reakce střídače přizpůsobit se měnícím se klimatickým podmínkám a adekvátní reakcí
- Sběr a analýza dat
- Chlazení a řízení teploty
- Servis

5.4.1 Windy Boy 5000A

Jak napovídá název, střídač Windy boy, konkrétně řada 5000A je určena pro provoz větrných elektráren a to do výkonu 21 kW. Jejich maximální účinnost dosahuje hodnoty 96,1 %, což patří při dnešní technologii mezi špičku ve svém oboru. Windy boy přeměňuje střídavé napětí větrných generátorů, které je také závislé na otáčkách rotoru na střídavé napětí, na napětí vyhovující parametrům distribuční sítě. Parametry střídače Windy Boy jsou uvedeny v příloze IV.



obr. 5.11 střídač Wwindy Boy 5000A

5.4.2 Windy Boy Protection Box

Windy Boy protection box slouží u větrných elektráren jako přepět'ová ochrana. V hybridním systému chrání střídač Windy Boy 5000A před příliš vysokým napětím generátoru a zároveň odvádí přebytečný výkon generátoru do zatěžovacích odporů. Windy Boy protection box je rovněž vybaven třífázovým usměrňovačem. Jeho parametry jsou uvedeny v příloze V.



obr. 5.12 WindyBoy protection box

5.4.3 Sunny Island 3324

Střídač pro ostrovní systém Sunny Island 3324 ve spojení s bateriovou jednotkou společně tvoří soběstačnou síť střídavého napětí, která dle výrobce splňuje ty nejvyšší standardy kvality. Do systému lze integrovat jak zdroje, tak spotřebiče elektrické energie, mezi nimi mohou být například fotovoltaické systémy, větrné elektrárny, diesel generátory, vodní elektrárny nebo blokové elektrárny. Ty všechny lze na AC straně systému kombinovat. Parametry střídače jsou v příloze VI.



obr. 5.13 střídač Sunny Island 3324

5.4.4 Sunny Boy 2100 TL

Tento typ střídače je kompatibilní se sítěmi TN-C, TN-S, TN-C-S. Tento střídač disponuje funkcí OptiTrac, jejíž princip spočívá v nalezení pracovního bodu s momentálně nejvyšším výkonem vzhledem k dynamicky se měnícímu počasí a denní době. Touto funkcí dokáže Sunny Boy 2100 TL nejlépe využít energetický potenciál slunečního záření za daných podmínek. Parametry sunny Boy 2100 TL jsou v příloze VII.



obr. 5.14 střídač Sunny Boy 2100 TL

5.5 Sunny WebBox

Činnost tohoto zařízení spočívá v dálkové diagnostice, ukládání dat a jejich vizualizaci. Shromažďuje všechny údaje o střídačích a díky němu je možné být informován o stavu systému. Tento datalogger přináší rozmanité možnosti zobrazování, archivace a dalšího zpracování dat i v počítačových sítích s vysokými požadavky na zabezpečení. Základní parametry jsou uvedeny v příloze VIII.



obr. 5.15 Sunny WebBox

5.6 Baterie OPzS 420

Tyto baterie mohou být používány ve staničních aplikacích nebo pro aplikace, které požadují opakující se nabíjecí a vybíjecí operace (cyklické použití). Řada LM je speciálně určena pro obtížné podmínky a specifické aplikace jako jsou například solární aplikace a dlouhé doby vybíjení. Jejich trubkové kladné desky, utěsněné pólové vývody a plně izolované spojky mezi články, zaručují dle výrobce jejich dlouhou životnost. Základní parametry jsou uvedeny v příloze IX.



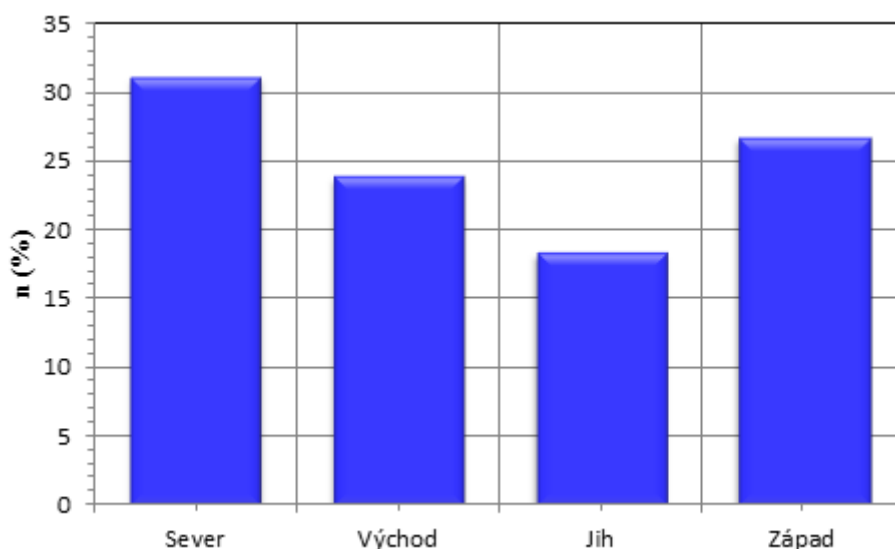
obr. 5.16 Baterie FIAMM řady LM

6 Vyhodnocení měření – energetické aspekty

V této kapitole jsou porovnány energetické aspekty hybridního systému na VŠB – TU Ostrava situované na budově L (HARD). Mezi posuzované aspekty patří posouzení lokality, porovnání výkonové křivky větrné elektrárny získané od dodavatele a výkonové křivky sestavené z dat, které byly získány prostřednictvím měření v období od 2. července 2010 do 31. března 2011. Toto období je dostačující pro vyobrazení reálné výkonové křivky. Mezi dalšími aspekty, které budou hodnoceny, jsou časový průběh toku elektrické energie měřeným na svorkách generátoru větrné elektrárny a v přípojném bodě, hladina napětí a velikost proudu, P-Q diagram a měření intenzity slunečního záření.

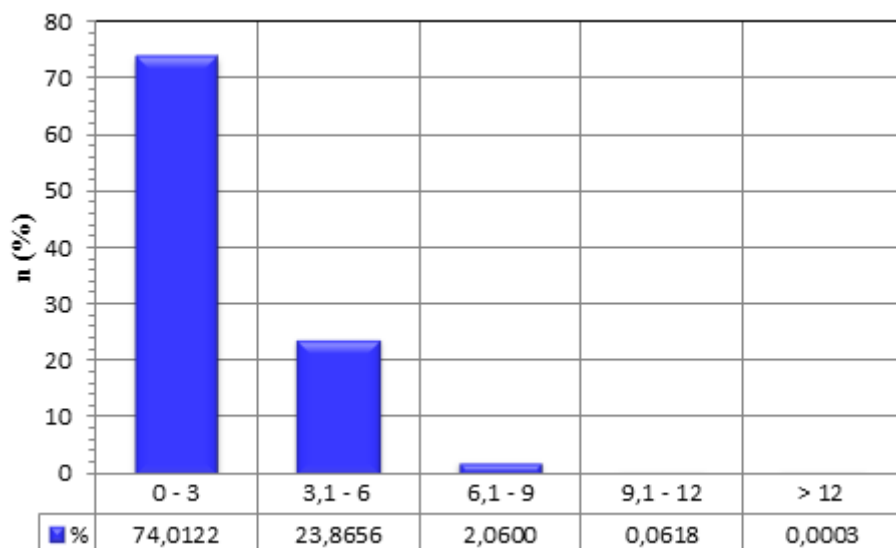
6.1 Posouzení lokality

V této podkapitole je popsáno posouzení lokality, v níž se hybridní systém nachází. Celý hybridní systém je situován v budově L – těžké laboratoře. Větrná elektrárna je situována na severozápadní straně objektu, osa rotoru je ve výšce 16 metrů a ve výšce 12 metrů je na stožáru instalována meteorologická stanice, jejíž senzory snímají aktuální hodnoty teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu, barometrický tlak, směr větru a rychlost větru.



obr. 6.1 četnosti směru větru

Na měřené stanoviště proudí nejvíce energie v podobě vzdušných proudů od severní a západní světové strany. Západní směr charakterizuje lesnatý porost, kterému předchází polnost, a severní stranu dotváří koridor mezi kolejemi VŠB – TUO a Menzou, potažmo budovou C. Data byla vyhodnocena z časového období od 25. února do konce března roku 2011.



obr. 6.2 četnosti rychlosti větru

Na obr. 6.2 jsou zobrazeny četnosti rychlosti větru ve vybrané lokalitě. Nejčastěji se rychlost větru pohybovala mezi hodnotami $0 - 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což je pod rozběhovou hranicí větrné elektrárny, naopak nejméně početné jsou vyšší rychlosti větru, při kterých větrná elektrárna dosahuje svého jmenovitého výkonu. Měřené hodnoty jsou z meteorologické stanice a tudíž je nutno je přepočíst na výšku osy rotoru větrné elektrárny dle vztahu:

$$c_{h_2} = c_{h_1} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a \quad (6.1)$$

c_{h_2} znamená rychlost větru v požadované výšce ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), c_{h_1} rychlost větru ve výšce, ve které byla rychlost větru měřena ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), h_1 (m) výška měření c_{h_1} , h_2 (m) výška rychlosti větru c_{h_2} a index a znamená exponent reliéfu krajiny. Hodnoty exponentu pro různé reliéfy krajiny jsou uvedeny v následující tabulce. V této lokalitě byl zvolen vzhledem k zástavbě reliéf krajiny 3.

tab. 6.1 charaktery jednotlivých reliéfů krajiny

Reliéf krajiny	Charakter krajiny	Exponent a (-)
0	otevřené pobřeží bez jakýchkoliv překážek s větrem směřujícím k pobřeží	0,12
1	otevřená krajina s ojedinělými volně stojícími keři a stromy	0,15
2	zemědělská krajina s rozptýlenými budovami a křovinami	0,18
3	uzavřená krajina s porostem stromů, mnoha křovinami a sousedícími budovami	0,24

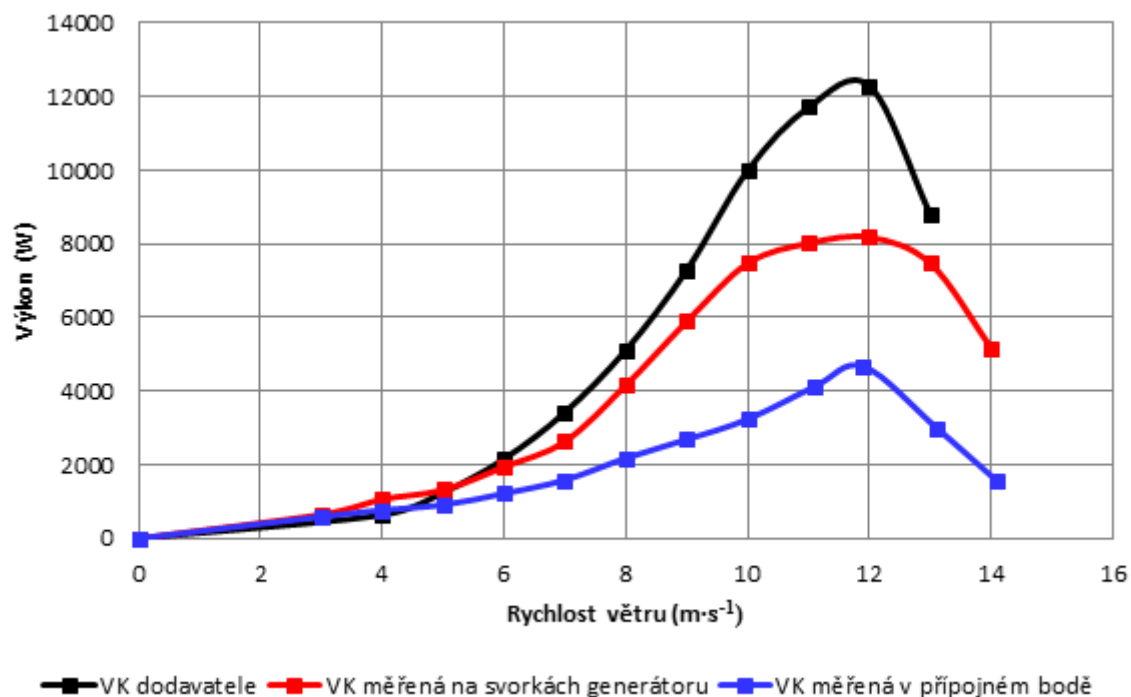
tab. 6.2 srovnání průměrné rychlosti větru

Měsíc	Rok	Průměrná rychlost větru Ostrava - Poruba	Dlouhodobá průměrná rychlost větru ze stanice v Ostravě-Mošnově ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Červenec	2010	1,7	3
Srpen	2010	2,4	2,9
Září	2010	2,9	3,2
Říjen	2010	2,6	3,8
Listopad	2010	3,4	4,7
Prosinec	2010	4,2	4,9
Leden	2011	4,6	4,8
Únor	2011	4,1	4,3
Březen	2011	2,8	4,3

V tab. 6.2 jsou porovnány průměrné rychlosti větru. Rychlost měřená v Ostravě-Porubě je získaná z meteorologické stanice umístěné na stožáru větrné elektrárny ve výšce 12 metrů nad zemským povrchem a v nadmořské výšce 266 m n. m. Jelikož se nachází osa rotoru je ve výšce 16 metrů a je nad profilem přilehlého lesního porostu, jsou tyto rychlosti přepočteny dle vztahu (6.1). Dlouhodobé průměrné rychlosti větru ze stanice v Ostravě-Mošnově jsou průměry za jednotlivé měsíce z let 1961 až 1990 měřeny v nadmořské výšce 256 m nad mořem.

6.2 Porovnání výkonové křivky VTE

Výkonová křivka od dodavatele je zobrazena na *obr. 6.3* a označena černou křivkou. Tato výkonová křivka byla porovnána s křivkou měřenou, na témže obrázku červenou barvou, získanou z dat průběžně ukládaných na PC v laboratoři L04 v budově L (HARD) z období 2. července 2010 až 31. března. Modrou barvou je značena výkonová křivka v přípojném bodě, ta je sestavena z dat z období od 25. února do 31. března 2010.



obr. 6.3 porovnání výkonových křivek

Z *obr. 6.3* jasně vyplývá, jak moc se jednotlivé výkonové křivky od sebe liší. Výkonová křivka od dodavatele je zcela nepochybně idealizována. Dle technické dokumentace k větrné elektrárně AP12 má být náběhová rychlost větru od $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což ve své podstatě odpovídá.

Nicméně největší diference nastává u špičkového výkonu, kterým má větrná elektrárna disponovat v hodnotě $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což ani vzdáleně realitě neodpovídá. Dle měřených a přepočítaných hodnot se špičkový výkon pohybuje okolo $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ale nikoli na hodnotě 12 kW, nýbrž na hodnotě 8 kW.

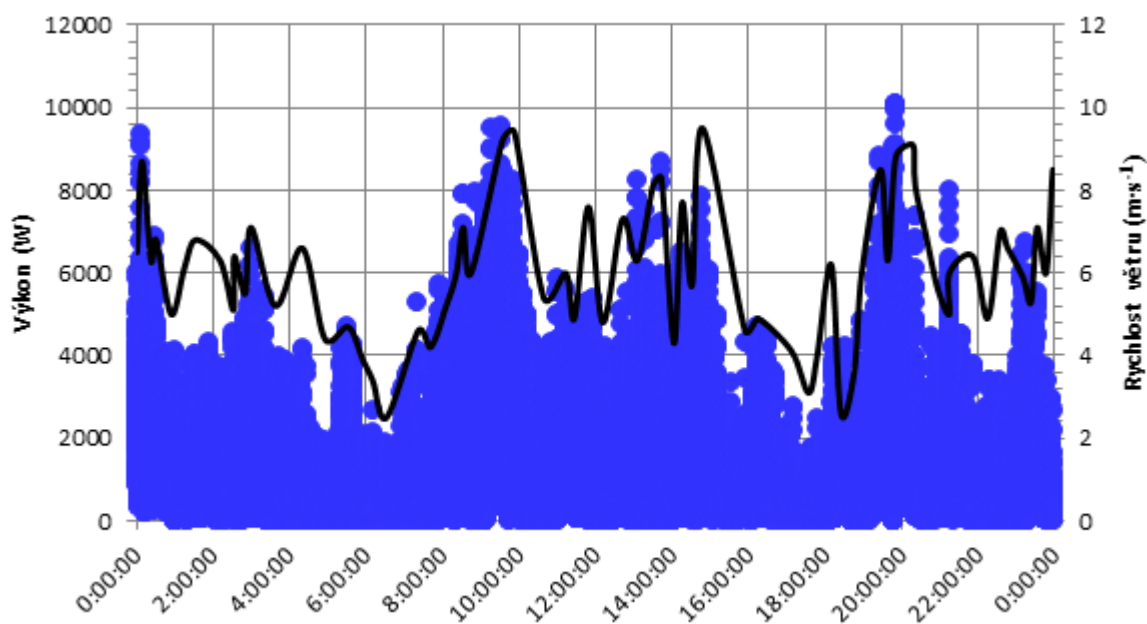
Tento jev může být zapříčiněn velkou proměnlivostí větru při jmenovité rychlosti, kdy dochází k velké spotřebě energie pro vytvoření dynamického momentu, jenž se ukládá v podobě setrvačnosti hmoty. Tyto energie mohou být následně zmařeny náhlou změnou rychlosti nebo směrem větru. Dalšími faktory zmiňovaného jevu mohou být nevhodný větrný motor, nebo špatně navržený generátor větrné elektrárny.

Porovnání výkonové křivky určené z dat měřených na svorkách generátoru a v přípojném bodě vypovídá o tom, kolik elektrického výkonu, potažmo elektrické energie je zmařeno na rezistorech a opožděnou reakcí střídačů, které předcházejí fázovacímu zařízení. Tyto rezistory jsou řízeny tak, aby byly synchronizovány na plné napětí z generátoru a poté uvolnily výkon do distribuční sítě skrze usměrňovače, střídače a fázovací zařízení.

Nutno podotknout, že výkonová křivka od dodavatele byla stanovena pro přímou odporovou zátěž a křivka vytvořená z měřených dat pro paralelní chod se sítí. Ovšem až nastane situace, kdy bude větrná elektrárna připojena do autonomního provozu hybridního systému, její účinnost stoupne, jelikož daleko větší množství energie bude akumulováno do baterií.

6.3 Výkonová bilance VTE

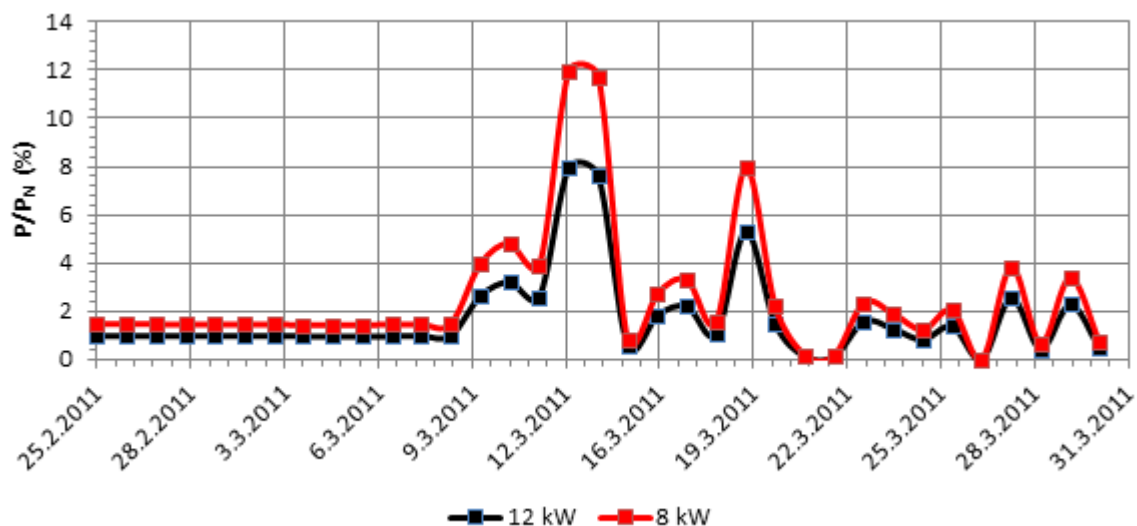
V této podkapitole je analyzován výkonový potenciál větrné elektrárny AP 12. Je porovnávána závislost rychlosti větru na okamžitém výkonu, tím pádem i ověření výkonových křivek ve větrném dnu a porovnání okamžitého výkonu vzhledem k instalovanému výkonu.



obr. 6.4 časový průběh výkonů pro větrný den v závislosti na rychlosti větru

Na levé svislé ose v *obr. 6.4* je uvedena hodnota činného výkonu modrou barvou. Jedná se o dodávku elektrického výkonu z pohledu generátoru větrné elektrárny. Špičkové hodnoty v průběhu větrného dne dosahují hodnoty i 10 000 W, kdy se patrně jednalo o poryvy větru. Rychlost větru je znázorněna na pravé svislé ose černou barvou. Hodnoty činného výkonu oproti rychlosti větru jsou znatelně posunuty směrem doprava. To je zapříčiněno setrvačností hmoty v podobě větrného motoru,

kdy prudké zvýšení rychlosti větru je zaznamenáno anemometrem ve stejném okamžiku, ovšem zaznamenání okamžitého výkonu je registrováno s určitým časovým zpožděním. Toto časové zpoždění není konstantní, jelikož přímo závisí na rychlosti větru, na jeho zvýšení, směru a době trvání.



obr. 6.5 porovnání výkonu vzhledem k instalovanému výkonu v čase

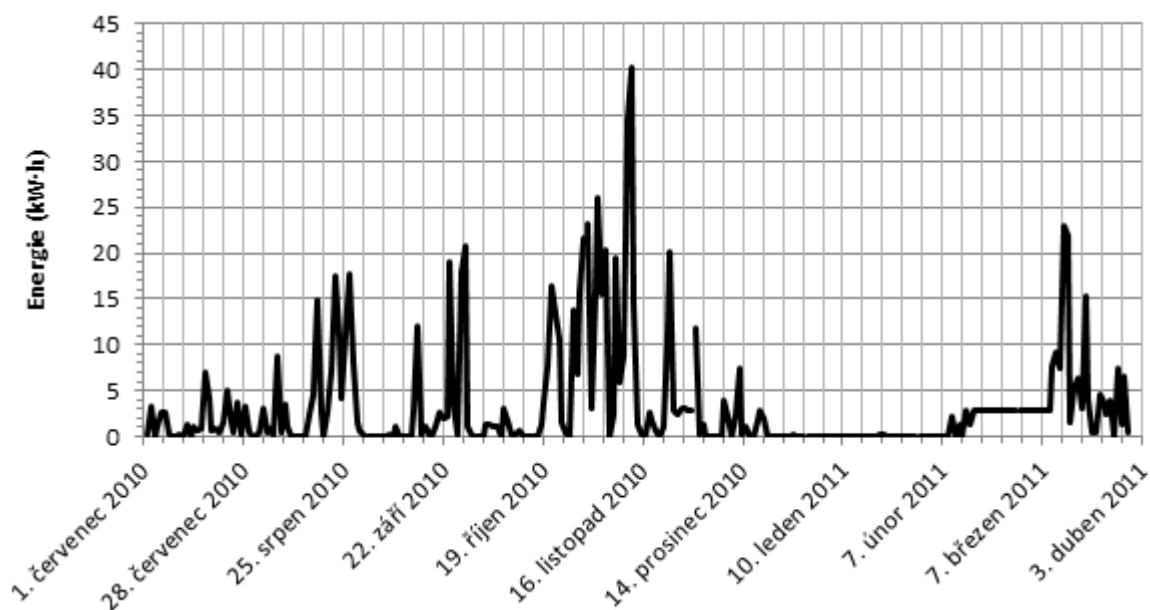
Na obrázku výše bylo provedeno porovnání okamžitého výkonu VTE vzhledem k instalovanému výkonu. Černou křivkou je znázorněný průběh dle informací od dodavatele.

Červenou křivkou průběh, který odpovídá změřené výkonové křivce, jenž vypovídá o tom, že se s největší pravděpodobností nejedná o větrnou elektrárnu o špičkovém instalovaném výkonu 12 kW, ale o větrnou elektrárnu na hranici výkonu okolo 8 kW.

Ve větrném období byla atakována hranice 12 % pro výkon 8 kW, která by se dala považovat za reálnou vzhledem k výkonu korespondujícímu s tímto obdobím.

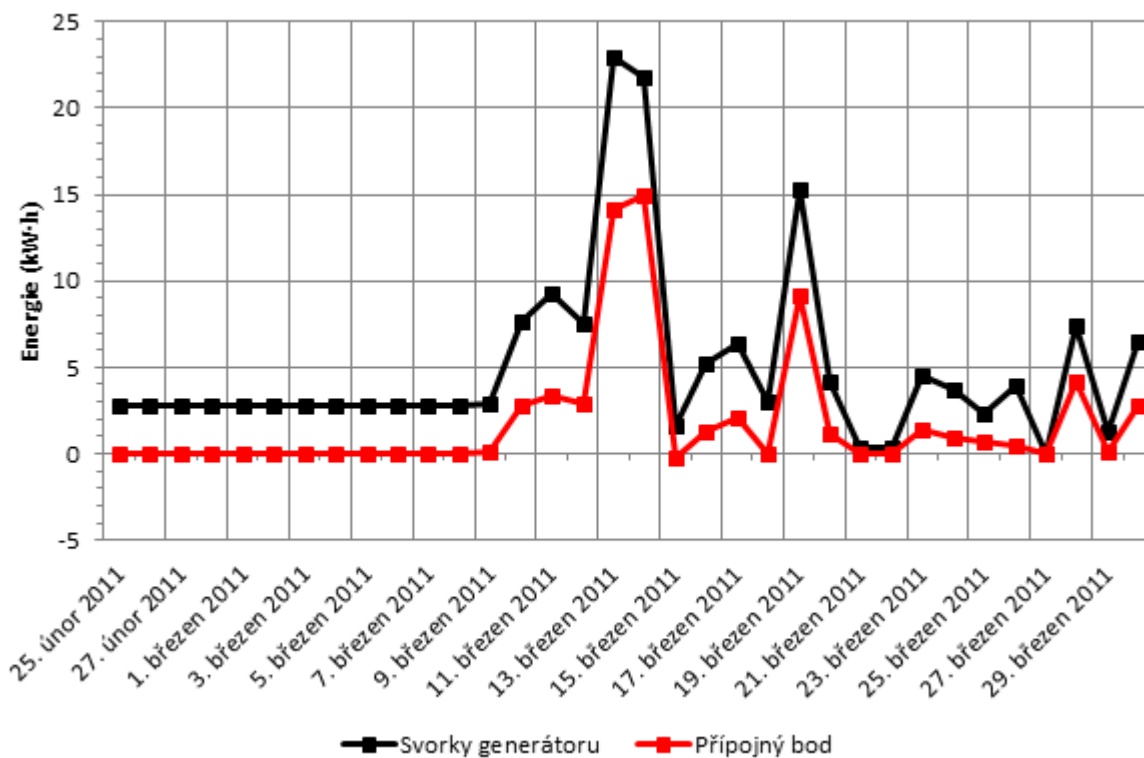
6.4 Časový průběh energie VTE

Na obrázku *obr. 6.6* je znázorněn časový průběh vyprodukované elektrické energie v období od 2. července 2010 do 31. března 2011. Energie je měřena na svorkách generátoru větrné elektrárny AP 12. Výkyvy ve výrobě elektrické energie jsou způsobeny několika faktory. Jedním z hlavních faktorů je, že celý systém je v testovacím provozu, tudíž relativně často nastávají výpadky systému, měřících přístrojů, monitorovacích zařízení, nebo se na systému pracuje, respektive se doladňuje jeho chod. Největší výpadek byl zaznamenán v období od 21. prosince 2010 do 9. března 2011.



obr. 6.6 časový průběh energie na svorkách generátoru

Na *obr. 6.6* je časový průběh produkce elektrické energie měřené na svorkách generátoru větrné elektrárny. Od počátku července až do listopadu roku 2010 má průběh elektrické energie vzestupnou tendenci s výjimkou dvou období. V prvním období, konkrétně od 11. do 15. srpna, nebyla monitorovacími přístroji zaznamenána žádná hodnota, respektive byly všechny nulové. V druhém období od 1. do 18. října měly jednotlivé dny velice malé hodnoty, což signalizovalo pozdější výpadek měřicího systému v posledních pěti dnech tohoto období. Mezi velice zajímavé lze považovat hodnotu vyprodukované elektrické energie ve dne 13. listopadu. V tento den se produkce ustálila na čísle 40,25 kW·h při průměrné rychlosti větru v tomto dni $5,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a rychlostech větru dosahujících až $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Od poloviny prosince do poloviny února byla větrná elektrárna mimo provoz. Toto období je charakteristické velkým počtem větrných dnů. Data, která by bylo možno získat, by kontinuálně doplnila řadu jednotlivých vzorků a ucelila tak celkovou představu o chodu celého systému větrné elektrárny.



obr. 6.7 srovnání energie na svorkách generátoru a v přípojném bodě

Na *obr. 6.7* je zobrazen časový průběh vyrobené elektrické energie od 25. února do 30. března, černá křivka zobrazuje průběh energie na svorkách generátoru větrné elektrárny, jejíž hodnoty byly záměrně zvoleny v intervalu uvedeném výše, tak aby korespondovaly se získanými daty z přípojného bodu, ve kterém je instalováno monitorovací zařízení MDS-U. Zařízení je nastaveno na vzorkovací frekvenci jedné minuty a vzhledem k interní paměti přístroje 512 kB lze uložit pouze data za období 35 dnů. Hodnoty ze svorek generátoru jsou na obrázku reprezentována červenou křivkou. Jedná se v podstatě o porovnání vstupu a výstupu větrné elektrárny čili rozdílu energií mezi svorkami generátoru a přípojným bodem.

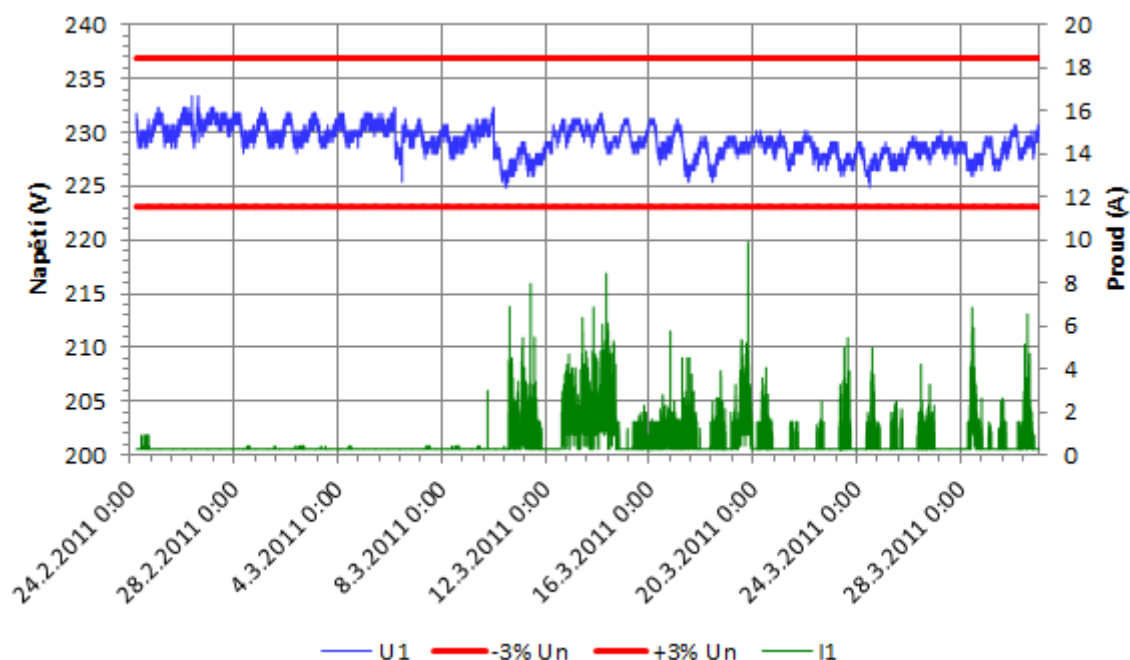
Na *obr. 6.7* je vidět, kolik energie spotřebují střídače a jiné komponenty zapojené v obvodu pro svůj provoz a kolik energie je dodáno do sítě. Největší podíl na ztrátách systému mají blokovací rezistory, které čekají na plné napětí na svorkách generátoru, mezitím je energie z nich mařena v podobě tepelné energie.

6.5 Průběh napětí a proudu

Ve vybraném časovém období, kdy byl průběh napětí měřen, lze na zařízení MDS-U nastavit různé parametry, pokud by měli být nastaveny parametry dle přílohy 4 PPDS: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí nízkého nebo vysokého napětí provozovatele distribuční soustavy,

$$\Delta u_{nn} \leq 3\%,$$

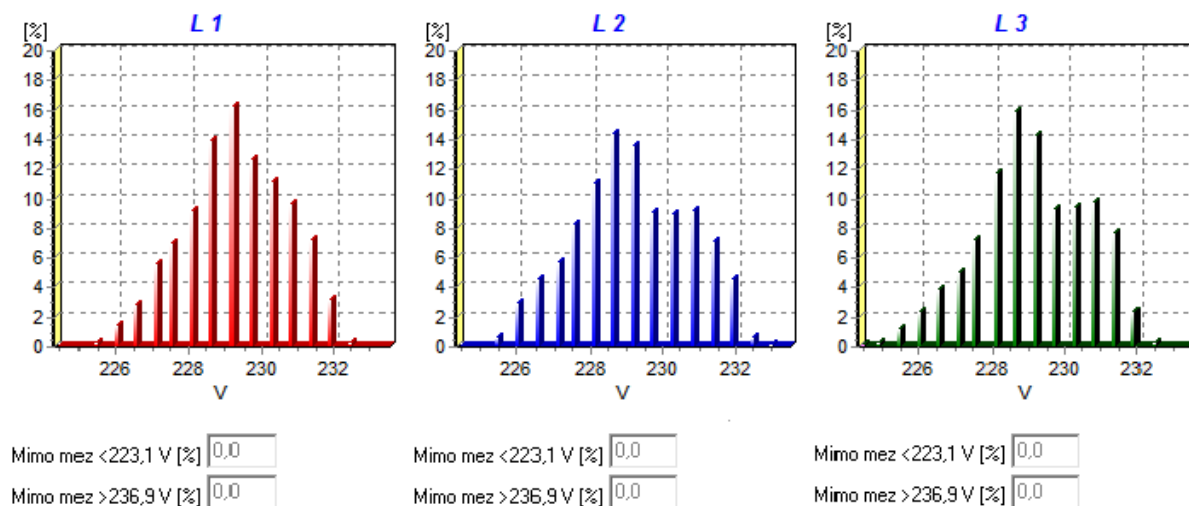
tzn., že hodnota napětí nesmí klesnout pod 223,1 V a přesáhnout 236,9 V. To je znatelné z *obr. 6.8* a z histogramu napětí na *obr. 6.9*.



obr. 6.8 průběh napětí a proudu během vybraného časového období

V časovém intervalu od 25. února do 31. března 2011 byla nashromážděna data, ze kterých bylo možno zpracovat graf zobrazený na *obr. 6.8*. Vzhledem k odstávce větrné elektrárny od poloviny prosince 2010 do poloviny února 2011 bylo dobíjení baterií hrazeno z fotovoltaické části systému. Napětí v elektrické síti nejčastěji kolísalo mezi hodnotami 228 a 232 V. V období kolem 7. března se pracovalo na znovu zprovoznění větrné elektrárny. Největší změna napětí v časovém průběhu se odehrála 10. března, kdy byla větrná elektrárna opět spuštěna. Od tohoto období je patrné, jak velký vliv má samotná větrná elektrárna, která je napěťovým zdrojem.

Elektrický proud dosahoval nejvyšších hodnot přesahujících 9 A při největším poklesu napětí. Tyto hodnoty byly naměřeny v období kolem 13. března, kdy byla největší produkce elektrické energie.



obr. 6.9 histogram napětí z vybraného období

Histogramy napětí z období od 25. února do 31. března tohoto roku jsou zobrazeny na obr. 6.9. Na hodnoty napětí byly stanoveny meze, které by neměly být překročeny. Pod histogramy jednotlivých fází jsou procentuálně zobrazeny hodnoty napětí mimo dané meze. V každé ze tří fází nebyly ani jednou tyto mezní hodnoty překročeny, což vypovídá o správném nastavení systému.

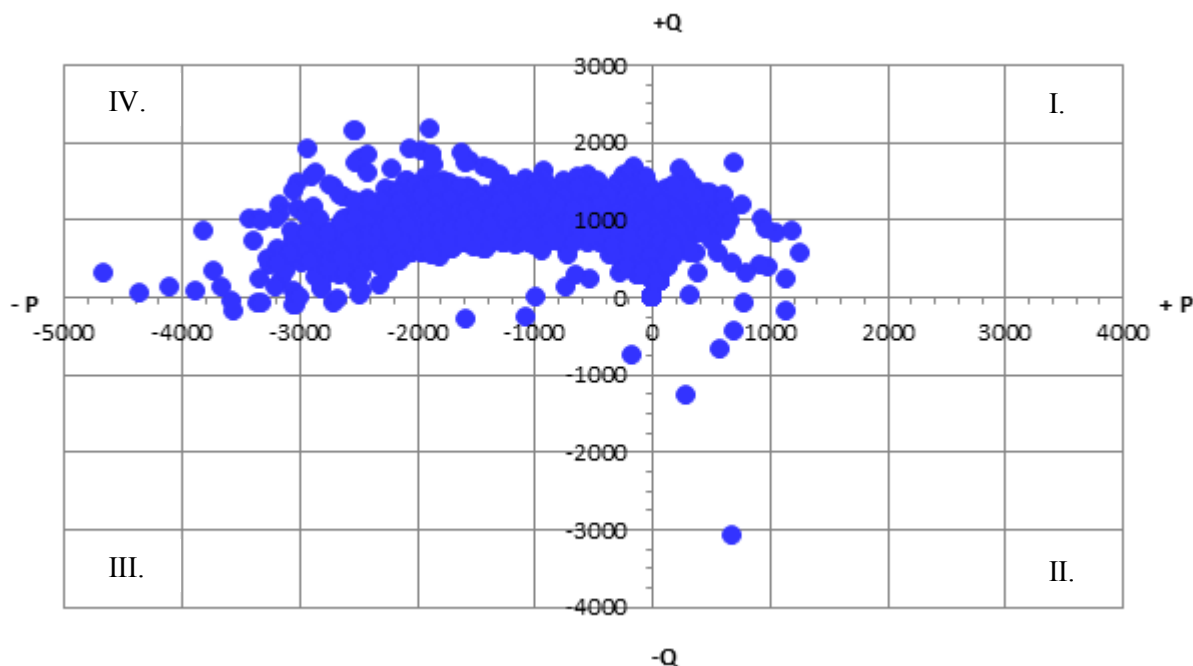
Mezi nejčastěji se vyskytující hodnoty napětí na fázovém vodiči L1 se nacházely v daném období hodnoty z intervalu 228 až 231 V a byly zastoupeny v 72 % naměřených hodnot. Mezi nejpočetněji zastoupené hodnoty patří hodnota 229,25 V, jež je zastoupena v 16 % případů. Naopak mezi nejméně zastoupené hodnoty patří hodnota 233 V, ta je zastoupena v počtu menším než 0,25 % případů.

Na fázovém vodiči označeném L2 byla nejčastěji zastoupena hodnota napětí 228,5 V, a to v podobě 14,5 % naměřených dat. Mezi intervalem hodnot 228 a 231 V bylo celkové množství dat na úrovni 66 %. Nejméně dat bylo nashromážděno v hodnotě 233 V, a to méně než 0,25 % dat.

Na posledním vodiči L3 bylo ve stejném intervalu od 228 do 233 V změřeno 70 % dat a nejvíce výskytů bylo zaznamenáno v téže hodnotě jako u vodiče L2, tedy ve 228,75 V v 15,75 % hodnot. Naopak nejméně početná skupina je jako u obou předešlých 233 V pod hodnotou 0,25 %.

6.6 P-Q diagram

Provozní diagram synchronního stroje, též známý jako P-Q diagram, charakterizuje pracovní body v tomto diagramu určené velikostí činného a jalového výkonu, v tomto případě v přípojném bodě. P-Q diagram tvoří pracovní oblast synchronního stroje.



obr. 6.10 P-Q diagram

Z P-Q diagramu na obr. 6.10 je zřejmé, v jakých režimech větrná elektrárna pracuje. V tomto P-Q diagramu označuje znaménko „-“ dodávku do rozvodné elektrické sítě a znaménko „+“ odběr ze sítě z pohledu generátoru větrné elektrárny. Tento diagram se vztahuje k období mezi 25. únorem a 31. březnem 2011.

V prvním kvadrantu, který je charakterizován motorickým režimem v podbuzeném stavu, větrná elektrárna spotřebovává činný a jalový výkon. Tento režim je charakteristický pro větrnou elektrárnu v momentě, kdy neprodukuje žádný elektrický výkon, ale spotřebovává jej pro svůj provoz. V tomto režimu větrná elektrárna odebrala 8,96 kW·h činné energie a 62,93 kvar·h jalové energie.

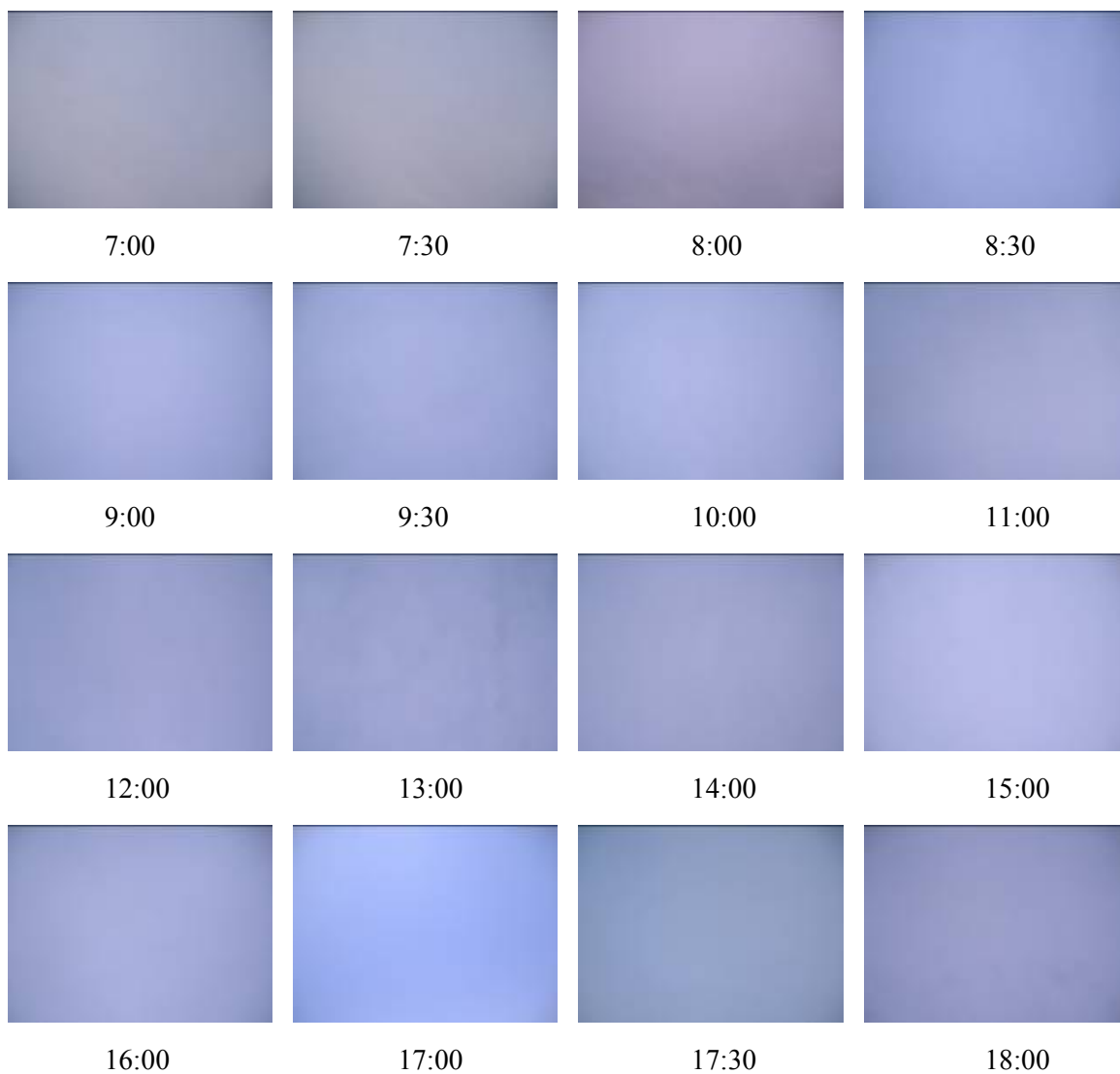
Druhý kvadrant definuje stav, kdy se generátor nachází v motorickém režimu v přebuzeném stavu. Tento kvadrant je vymezen spotřebou činného výkonu a dodávkou jalového výkonu do sítě. Spotřeba činné energie byla v tomto období 0,07 kW·h a hodnota dodané jalové energie 0,1 kvar·h.

Třetí kvadrant u provozního diagramu synchronního stroje je ohraničen dodávkou činného výkonu a dodávkou jalového výkonu v téže okamžiku. V tomto režimu nese kvadrant označení generátorický režim v přebuzeném stavu. V tomto režimu byla dodávka činné energie 0,59 kW·h a dodávka jalové energie 0,04 kvar·h.

Čtvrtý kvadrant P-Q diagramu vyjadřuje generátorický režim v podbuzeném stavu a je vyjádřen dodávkou činného výkonu a odběrem jalového výkonu. Tento pracovní kvadrant by měl být hlavním režimem větrné elektrárny. V tomto režimu je nejpočetnější množství zastoupených údajů. Větrná elektrárna dodala do sítě 70,76 kW·h a odebrala 110,77 kvar·h.

6.7 Fotovoltaická část systému

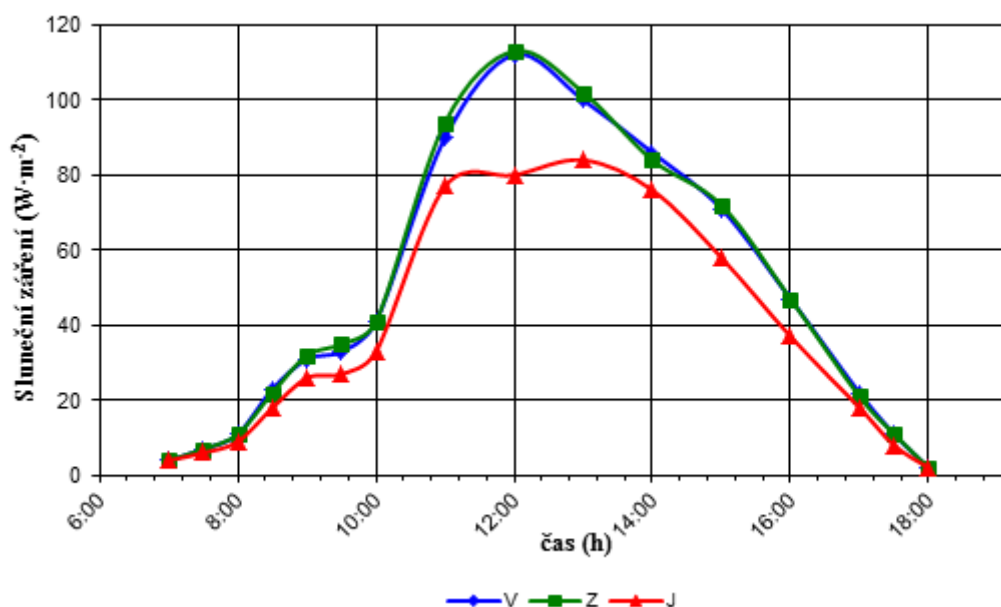
Fotovoltaická část systému je umístěna na střeše budovy L (HARD). Tato část hybridního systému byla uvedena do provozu k 1. 12. 2010. Panely čínského výrobce dosahují špičkového výkonu jednoho panelu 180 W_p. Na střeše je celkem umístěno 11 panelů, z toho 5 na západní straně objektu s odchylkou od jihu + 105° a 6 panelů na východní straně s odchylkou -75° od jihu. Celá střecha má sklon odpovídající hodnotě přibližně 10°.



obr. 6.11 snímky zatažené oblohy

Na obr. 6.11 jsou zobrazeny stavy oblohy nad měřeným fotovoltaickým systémem, které byly pořízeny v měsíci listopadu roku 2010. Prvních sedm snímků bylo pořízeno v časovém intervalu 30 minut, ostatní pak během hodinového intervalu. Poslední tři snímky pak byly vyfoceny v témže intervalu jako prvních sedm.

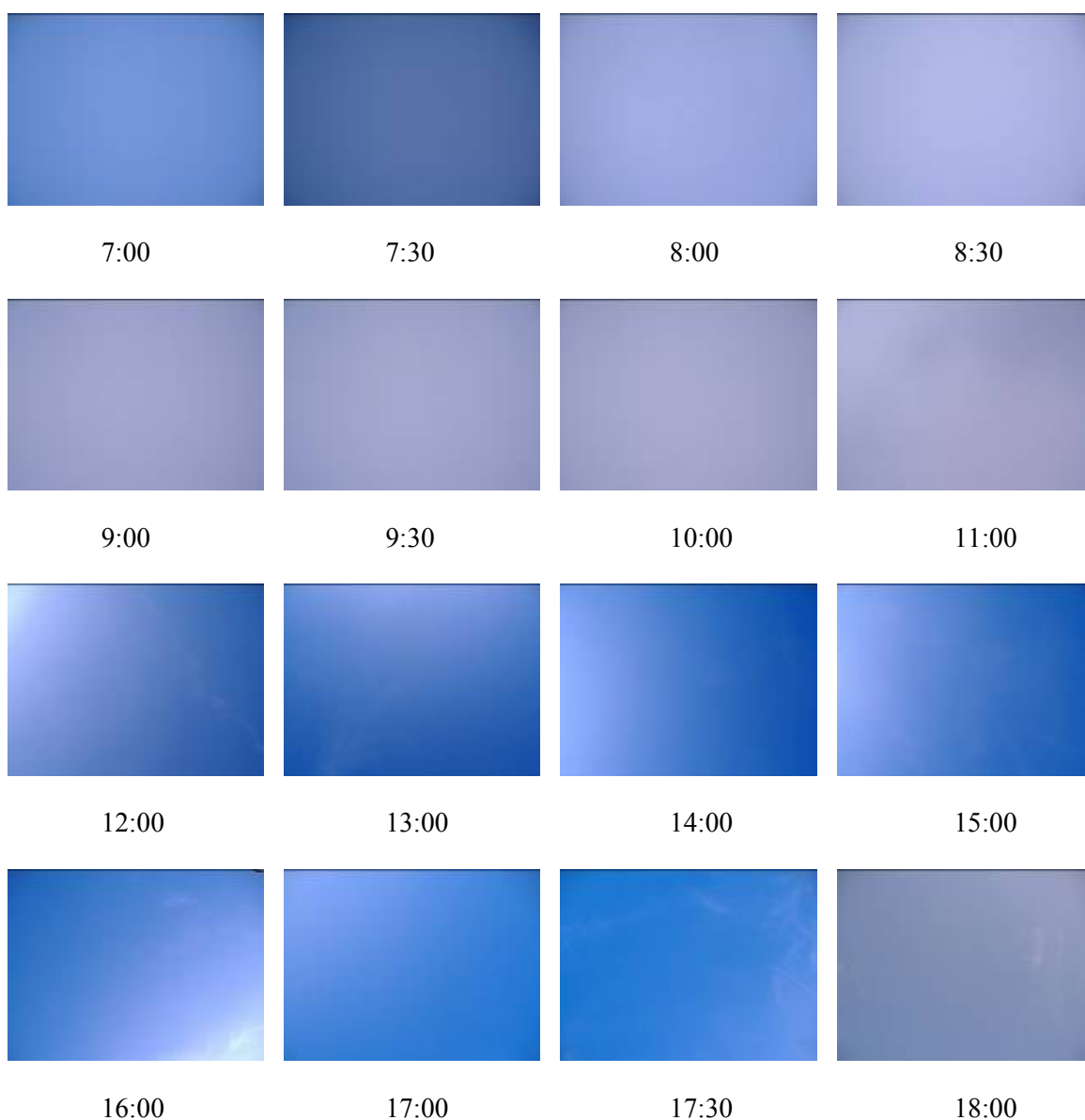
Sluneční záření, které představuje základní zdroj energie pro veškeré procesy probíhající v atmosféře a na zemském povrchu, lze rozdělit na dvě části, a to na sluneční záření přímé a rozptýlené (difúzní). Přímé sluneční záření přichází do oka pozorovatele ze Slunce a vzhledem k velké vzdálenosti Země od Slunce tvoří svazek prakticky rovnoběžných paprsků. Rozptýlené sluneční záření vzniká následkem rozptylu přímých slunečních paprsků na molekulách plynných složek vzduchu, na vodních kapičkách, ledových krystalech a na nejrůznějších aerosolových částicích vyskytujících se v zemském ovzduší.



obr. 6.12 intenzita slunečního záření během zataženého dne

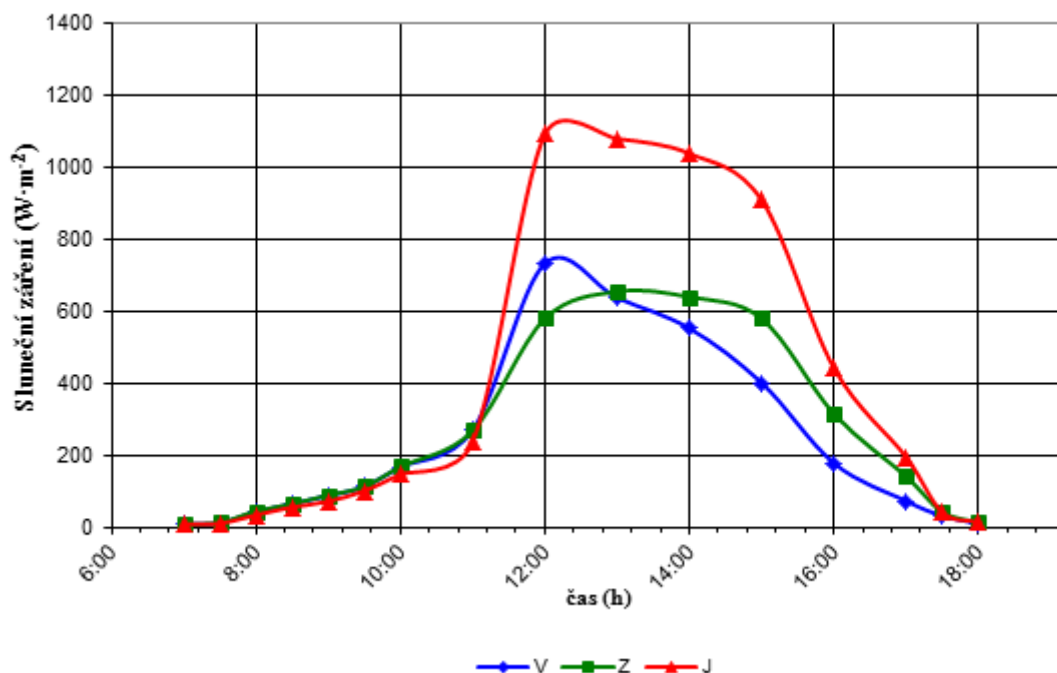
Ze snímků zatažené oblohy obr. 6.12 je zajímavá křivka jižní strany, jejíž hodnoty se pohybují pod hodnotami západní a jižní strany.

Při měření slunečního záření v zatažený den, tedy při difúzním horizontálním záření, čili rovnoměrně zatažené obloze, se světelné kvantum více odráží od molekul a částic, které jsou obsaženy v horizontální rovině, a tudíž dopadá více světelného výkonu na východně a západně orientované fotovoltaické panely. Při souvislé zatažené obloze dosahuje hodnota slunečního záření maximálně okolo $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, může ale i tuto hodnotu lehce přesahovat, a to v závislosti na složení částic, které v ten okamžik tvoří rovnoměrně zataženou oblohu.



obr. 6.13 snímky jasné oblohy

Na *obr. 6.13* jsou zachyceny snímky jasného dne ve stejném intervalu jako snímky z *obr. 6.11*. Za přímé záření se považuje záření, které při průchodu atmosférou nebylo odraženo ani pohlceno a znovu vyzářeno. Difúzní záření je to záření, které se odrazilo od částic obsažených v atmosféře a změnilo směr. Toto odražené záření má ovšem stejnou vlnovou délku jako záření přímé. Množství difúzního záření závisí na oblačnosti a znečištění atmosféry. Tyto jevy naopak zmenšují množství přímého záření. Například při zatažené obloze dopadá na povrch Země pouze difúzní záření.



obr. 6.14 intenzita slunečního záření během slunečného dne

Z obr. 6.12 je patrné, že při slunném dnu je nejvyšší hodnota slunečního záření na jižní světové straně. S ohledem na místo instalace je hodnota $1089 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ naměřená v 12:00 velmi vysoká vzhledem k solární konstantě, jež je $1373 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ dopadajících na povrch zemské atmosféry. Teoreticky může být hodnota slunečního záření krátkodobě i přes $1100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, a to pokud jsou na obloze rozptýlená světlá oblaka, od nichž se záření silně odráží.

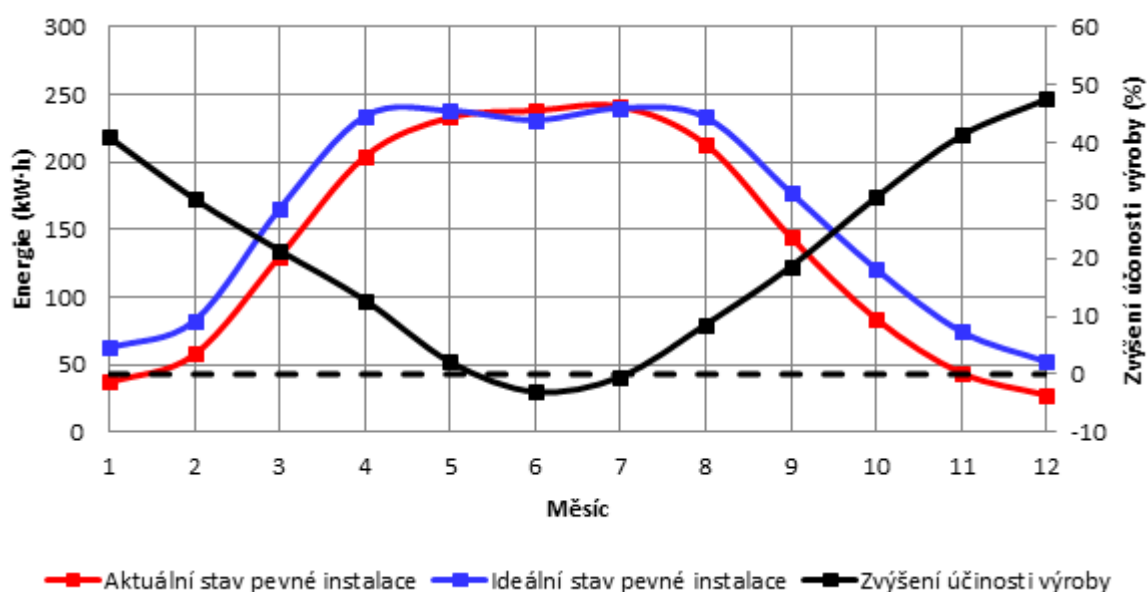
Oproti snímkům ze zataženého dne je hodnota u slunečného dne u intenzity slunečního záření téměř desetinásobná, což má nepochybně vliv na výrobu elektrické energie fotovoltaickou částí hybridního systému.

6.8 Predikce výroby pomocí PVGIS

V této podkapitole bude provedena teoretická analýza možných stavů instalace fotovoltaické části hybridního systému.

PVGIS je webová on-line aplikace určena k tomu, aby pomohla uživatelům získat více informací o potenciálu fotovoltaických systémů, jakožto zdroje elektrické energie. Skutečnost, že webové stránky PVGIS byly zpřístupněny Evropskou komisí, neznámá, že výpočty uváděné na tomto webu jsou nutně správné, natož oficiální. Jsou ovšem dostatečně přesné pro orientační výpočty. Systém vyhodnocuje data, z původní databáze pro Evropu, která jsou založena na interpolaci měření pozemních stanic, jež čítají dlouhodobý měsíční průměr globálního a difúzního záření na vodorovnou plochu. Data byla původně součástí evropského slunečního atlasu. Doba údajů je 10 let, a to od roku 1981 do roku 1990.

Druhý typ vyhodnocení údajů je založen na výpočtech z družicových snímků a databáze celkem čítá 12 let údajů. Od první generace družic Meteosat (Meteosat 5-7), známé jako MFG, kdy byla shromážděna data z let 1998 – 2005 a z druhé generace družic Meteosat, známé jako MGS, obsahují data z období od června 2006 do května 2010. V tomto případě je použit druhý typ vyhodnocení údajů vzhledem ke stáří dat, které korespondují více se současnou situací

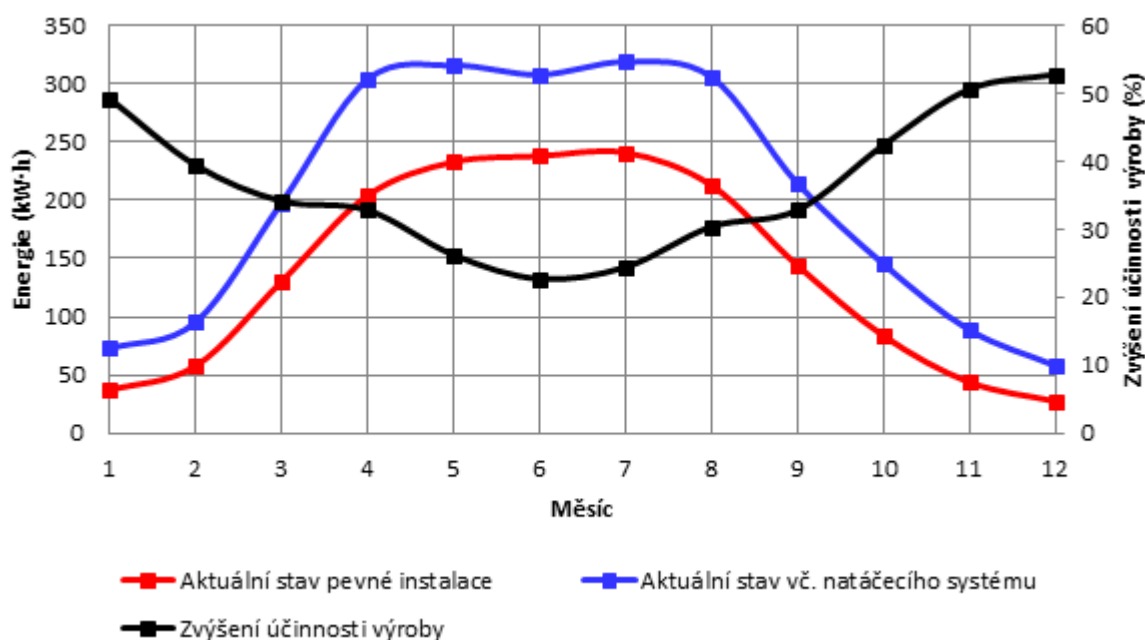


obr. 6.15 srovnání aktuálního a ideálního stavu instalace

Na obr. 6.15 jsou porovnány dvě modelové situace pomocí webové aplikace PVGIS. Červená křivka znázorňuje průběh možné vyrobené elektrické energie v časovém horizontu jednoho roku. Nejnížší hodnoty jsou logicky v zimních měsících a nejvyšších možných hodnot je možné dosáhnout v letních měsících. Toto tvrzení je podloženo průběhem globálního záření, které koresponduje s osou rotace planety Země a úhlem dopadajícího záření vzhledem k postavení Slunce na obloze.

Modrá křivka zaznamenává taktéž možnou výrobu elektrické energie, ale s rozdílnými azimuty nezahrnujícími hodnotu 105° a -75° , nýbrž s azimutem ideálním pro naše podmínky, který činí -2° odchylku od jihu. Sklon panelů není rovněž pod stejným úhlem 10° , ale pod úhlem opět ideálním, a to pro naše podmínky roven 35° .

Největší diference výkonů je v zimním období, kdy dopadá sluneční energie na povrch Země jen velmi málo. Právě tehdy je každá odchylka od jižní strany společně se sklonem panelů rozhodující. V ideálním případě se pohybují hodnoty, o které lze zvýšit produkci energie, v rozmezí od 40 % do 50 %, což je vskutku markantní rozdíl. Ovšem ideální hodnoty jsou méně vhodné pro letní měsíce, kdy je Slunce kolmo na zemský povrch. V tomto období je naopak potřeba co nejmenšího sklonu panelů tak, aby bylo možné zachytit co nejvíce dopadajících fotonů na optimální rovinu, tedy nejlépe pod sklonem 0° . Proto je černá křivka pod úrovní čerchované čáry v záporných hodnotách. Nejnižší hodnotou v tomto obrázku je dosaženo v měsíci červnu, a to - 3%. To je ovšem zanedbatelné vzhledem k zisku ze zimních měsíců. Při stávajícím typu instalace je koeficient ročního využití roven hodnotě 9,5 % a při optimálních podmínkách sklonu a azimutu panelů 11 %.

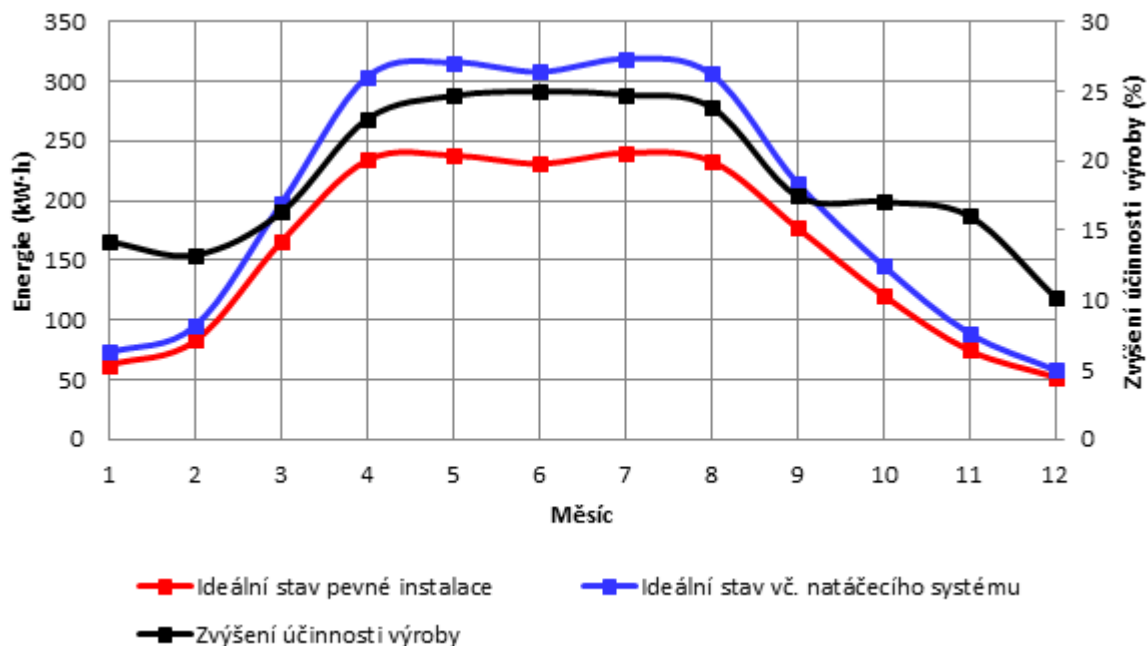


obr. 6.16 srovnání aktuálního a možného stavu s natáčecím 2osým systémem

Na obr. 6.16 je zohledněno zvýšení účinnosti výroby instalací dvouosého natáčecího systému. Tento systém by měl za úkol natáčet své osy jak ve vertikální poloze, tak i v horizontální. Tedy maximálně využít sluneční záření dopadající na fotovoltaické panely a přeměnit je v užitečnou energii. Tato energie by se akumulovala v bateriích a zaručovala provoz systému společně s větrnou elektrárnou.

V zimních měsících, kdy je elektrické energie nejvíce potřeba, ať pro osvětlovací techniku, nebo pro pocit tepelné pohody, je instalací dvouosého natáčecího systému možné zvýšit produkci

elektrické energie i o více jak 50%. V průměru za celý rok je možné vyprodukovat o více než 36% této veličiny více, než se stavem, kterým je momentálně provozován. Tato hodnota je více než úctyhodná, ovšem vše také záleží na nákladech spojených s tímto typem instalace a je potřeba vše pečlivě zvážit, neboť právě návratnost investic je v dnešní době jedním z hlavních kritérií investice. Druhou možností je popřípadě nelezení kompromisu řešení v podobě pouze jednoosého natáčecího systému. Pokud by byl instalován dvouosý natáčecí systém, hodnota ročního koeficientu by se rovnala 14 %.



obr. 6.17 srovnání ideální instalace a dvouosého natáčecího systému

Posledním obrázkem v této podkapitole je obr. 6.17. Na tomto obrázku je zachyceno srovnání systémů pevné instalace ideálních parametrů azimutu a sklonu panelů, a navíc aplikace dvouosého natáčecího systému. Z obrázku již neplyne tak markantní rozdíl jako u předchozích dvou porovnání, jelikož ideální parametry jsou samy o sobě dosti výřečné, ale i přesto nastává diference v produkci elektrické energie. Zde je ovšem nejvýznamnější rozdíl v letních měsících, což je opakem k předchozím srovnáním, a důsledkem výše popsaného jevu, kdy sluneční paprsky dopadají přes léto kolmo na zemský povrch. Tehdy se nejvíce sklon 35° jako ideální. Aplikací otočného systému lze ovšem dosáhnout v letních měsících zvýšení výroby těsně pod hranici atakující 25%.

7 Posouzení ekonomických aspektů

V této podkapitole jsou zhodnoceny ekonomické aspekty hybridního systému na VŠB – TU Ostrava. Jedná se o hrubé ekonomické zhodnocení, a to protože je systém teprve na začátku své funkce a nevyhýbají se mu občasné výpadky spojené s doladěním systému. V této kalkulaci se tedy vychází částečně z naměřených dat, ale převážně z teoretických výpočtů a modelových situací.

tab. 7.1 pořizovací náklady VTE AP 12

VTE AP 12	Položka	Částka (Kč)
Investiční část	Generátor	120 000
	Výkonová elektronika	390 000
	Stožár	220 000
	Větrný motor	160 000
Neinvestiční část	AC/DC regulace	40 000
	Kompenzace	40 000
	Převodníky veličin	12 000
	Silový kabel	22 000
	Výkopové práce	70 000
Celkové náklady	1 074 000	

Největší procento z celkových nákladů pokrývá položka s názvem výkonová elektronika, a to 36 %. Naopak nejmenším artiklem v této investici byly převodníky veličin s 1 % zastoupením.

Větrná elektrárna AP12 o udávaném špičkovém výkonu 12 kW by měla při jmenovité rychlosti větru $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ produkovat maximální výkon, což skutečnosti neodpovídá. Proto bude provedeno porovnání dvou případů VTE s instalovaným výkonem 12 kW a 8 kW.

Pokud by byl brán v potaz u větrné elektrárny roční koeficient využití $k_f=8 \%$ vzhledem k lokalitě umístění, pak

$$k_{r12kW} = \frac{W_r}{P_i \cdot h} \Rightarrow 0,08 = \frac{W_r}{12 \cdot 8760} \Rightarrow W_r = 8\,410 \text{ kW} \cdot h \quad (7.1)$$

$$k_{r8kW} = \frac{W_r}{P_i \cdot h} \quad \Rightarrow \quad 0,08 = \frac{W_r}{8 \cdot 8760} \quad \Rightarrow \quad W_r = 5\,606 \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (7.2)$$

Průměrná hodnota koeficientu využití se pohybuje okolo 12 %. V této kalkulaci je uvažováno s 8 % vzhledem k lokalitě, ve které se hybridní systém nachází. V rovnicích (7.1) a (7.2) je spočtena teoretická roční výroba elektrické energie, která by byla dodána do sítě za předpokladu, že by všechna energie byla vyvedena do elektrické distribuční sítě. Druhou možností je spotřeba v rámci Zeleného bonusu, tedy vlastní spotřeby a prodeje přebytku do elektrické sítě..

tab. 7.2 různé varianty návratnosti investic větrné elektrárny

Větrná elektrárna	Uvedení do provozu 2010		Uvedení do provozu 2011	
Instalovaný výkon	Návratnost - dodávka do sítě (roky)	Návratnost – zelený bonus (roky)	Návratnost - dodávka do sítě (roky)	Návratnost - zelený bonus (roky)
12 kW	67	24	69	24
8 kW	99	36	101	36

Při výpočtu návratnosti větrné elektrárny jsou porovnána dvě období uvedení do provozu (2010, 2011). Tato období byla vybrána záměrně tak, aby korespondovala s výkupními cenami energie přeměněnou ze slunečního záření pro téže období, kdy nastal významný rozdíl. V kalkulaci jsou použity výkupní ceny pro přímou dodávku do sítě a využití zeleného bonusu, tarif elektrické energie D02D (4,61 Kč za kW·h), což je nejpoužívanější sazba v České republice. Dále valorizace výkupní ceny o 2 % ročně, průměrně klesající účinnost větrné elektrárny 2% ročně, v této klesající účinnosti je zahrnuta celková amortizace. Na druhou stranu není v těchto návratnostech zahrnuto pojištění a pravidelná údržba.

V případě 8 kW větrné elektrárny je dosaženo nejlepšího výsledku u Zeleného bonusu. Tato možnost ocenění elektrické energie v sobě zahrnuje finanční prostředky inkasované od distributora sítě. Navíc si investor k době návratnosti může přičíst finance za ušetřenou elektrickou energii, kterou by jinak musel odkoupit od provozovatele distribuční sítě.

U návratnosti fotovoltaické části systému o instalovaném výkonu 2 kW_p jsou zohledněny základní faktory obsahující tarif elektrické energie DO2D, valorizace výkupní ceny 2 % ročně, pokles výkonu na 90 % v prvních 12 letech a 80 % v následujících 13 letech – garantováno výrobcem. V této kalkulaci, stejně jako u větrné elektrárny, není započteno pojištění a údržba.

tab. 7.3 investiční náklady na fotovoltaickou část

FVE	Položka	Cena (Kč)
	Investiční část	160 000
	Neinvestiční část	340 000
Celkem		500 000

Součástí investiční a neinvestiční části jsou tyto položky:

- Solární inverter SMA SB 2100 TL
- 11 ks FV panelů 180 W
- Inverter SMA Windyboy 5000A
- Investor SMA Sunny Island 3324
- Sunny WebBox
- 24 ks repasovaných baterií OPzS 420
- Rozváděč
- Montážní materiál

Kalkulace fotovoltaické části systému vychází z teoretických předpokladů z kapitoly 6.7 *Predikce výroby pomocí PVGIS*. V tab. 7.4 je provedeno finanční srovnání tří variant instalace systému a porovnání případů z dvou období instalace. Od počátku roku 2011 byly sníženy výkupní ceny ze zdrojů využívající sluneční záření o 5 Kč za vyrobenou kW·h, v následující tabulce je porovnání návratnosti v období před a po snížení.

tab. 7.4 různé varianty návratnosti investic fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaická část hybridního systému	Uvedení do provozu 2010		Uvedení do provozu 2011	
	Návratnost - dodávka do sítě (roky)	Návratnost - zelený bonus (roky)	Návratnost - dodávka do sítě (roky)	Návratnost - zelený bonus (roky)
Aktuální stav	23	18	39	27
Ideální stav	20	16	33	24
Aktuální + natáčecí systém	16	14	26	21

Při aktuálním stavu instalace opět nejlépe vychází možnost Zeleného bonusu, návratnost této části systému je necelých 18 let a 3 měsíce. Nejlepších výsledků je dosaženo při instalaci natáčecího systému, zde je ovšem nutno brát v potaz další investice spojené s instalací tohoto typu, tudíž by návratnost investice nebyla za 13,6 let, ale později. Vše by záleželo na obchodních podmínkách, spolehlivosti provozu a ceně samotného natáčecího systému.

Návratnost investice celého hybridního systému při kombinaci větrné elektrárny 8 kW a fotovoltaické elektrárny 2 kW činí 27,28 let. Za tuto dobu by měl systém vyprodukovat 121 590 kW·h elektrické energie. Snížení doby návratnosti by mohlo být dosaženo při větším instalovaném výkonu fotovoltaických panelů.

Nicméně v případě Zeleného bonusu se nepočítá s akumulací elektrické energie, ale s její přímou spotřebou a prodejem přebytků do veřejné elektrické sítě. V případě autonomního hybridního systému se nebude mařit vyprodukovaná elektrická energie na synchronizaci se sítí a v případě přebytku energií, kdy bude její minimální spotřeba, se bude energie akumulovat do baterií, nebo například využívat pro ohřev teplé vody.

Proto hybridní zdroje elektrické energie s možností akumulace budou mít kratší dobu návratnosti, než v případě Zeleného bonusu, nebo přímé dodávky do elektrické sítě. S touto možností ovšem legislativa dostupná v současnosti nepočítá.

8 Závěr

Česká republika se zařadila mezi členské státy Evropské unie, které loni splnily stanovený rozsah využití obnovitelným zdrojů energie. Dílčí cíl 8 % byl podle odhadů splněn, a dokonce překonán o 0,3 procenta. Obnovitelné zdroje elektrické energie zažívají v posledních letech dynamický rozvoj, který se projevuje novými technologiemi a zvyšováním účinnosti fotovoltaických článků. U větrných elektráren roste velikost instalovaného výkonu a v dnešní době dosahuje hodnoty i 6 MW.

Obnovitelné zdroje elektrické energie mají určitě své místo v životě moderního člověka, je ovšem zapotřebí je využívat zodpovědně a s rozvahou, a nikoliv jen pro splnění indikativních cílů, jako se stalo v době minulé. Před několika málo lety musely zemědělské polnosti ustoupit investičním plánům investorů kvůli výstavbě megawattových fotovoltaických elektráren rozmístěných na vhodných územích, se kterými je spojena problematická dodávka energie do distribučních i přenosových sítí. Právě proto by měly být obnovitelné zdroje elektrické energie rozmístěny decentralizovaně a jejich elektrickou energii by měli spotřebovávat obyvatelé v těchto regionech.

V rámci diplomové práce byly hodnoceny energetické a ekonomické aspekty obnovitelných zdrojů elektrické energie. Hybridními systémy využívajícími obnovitelné zdroje elektrické energie se zabývá druhá kapitola. Ta popisuje jejich výhody a nevýhody a zároveň zde byly popsány dva základní typy instalací, které je možno provozovat. Prvním je ostrovní systém, druhým pak systém spolupracující s veřejnou distribuční sítí. S tím souvisí i možnosti akumulace elektrické energie, jež jsou dostupné v dnešní době vzhledem k technologickému pokroku v této oblasti.

V následující třetí kapitole byla řešena podstata fotovoltaického jevu a stručně popsána historie využití sluneční energie pro energetické potřeby. Dále zde byly uvedeny nové technologie fotovoltaických článků a s tím spojený proces výroby aktuálních fotovoltaických panelů. Důležitou podkapitolou v této části jsou charakteristické parametry pro fotovoltaické panely, které vnášejí do této oblasti teoretický náhled nutný pro pochopení zákonitostí, jež platí v praktických podmínkách využití, a následně jsou vztaženy na stávající situaci v podmínkách České republiky.

Pro pochopení principu přeměny větrné energie byla zpracována čtvrtá kapitola. V ní je popsána historie využití větrné energie pro potřeby obyvatel datující se do 13. století na našem území. Pokračuje podkapitolou vysvětlující vznik větru a princip, jak funguje větrná elektrárna včetně její konstrukce a technických podmínek. V rámci této kapitoly byla zpracována část, která se zabývá problematikou větrných podmínek v rámci České republiky.

Kapitola pátá se zabývá popisem hybridního systému v areálu VŠB – TU Ostrava. Vysvětluje vznik tohoto projektu v návaznosti na popis komponentů, ze kterých se celý hybridní systém výroby

elektrické energie skládá. V této kapitole je detailně popsána větrná společně s fotovoltaickou částí systému včetně zařízení, která zajišťují celou soustavu v provozu.

V šesté kapitole byly analyzovány energetické aspekty této soustavy a posouzení lokality, v níž se systém nachází. Mezi posuzovanými energetickými aspekty byla výkonová křivka větrné elektrárny, která byla podrobena konfrontaci výkonovou křivkou tvořenou měřeními daty na svorkách generátoru a výkonovou křivkou získanou z dat v přípojném bodě. Mezi dalšími aspekty v této kapitole byla produkce elektrické energie na svorkách generátoru za měřené období, která byla následně porovnávána s elektrickou energií vyvedenou do přípojného bodu. Nedílnou součástí bylo i měření provedené na fotovoltaické části systému. Zde bylo vyhodnoceno měření, které proběhlo na střeše budovy L v areálu VŠB- TU Ostrava. Jsou zde zachyceny snímky zataženého a jasného dne a k nim zpracovány průběhy intenzity slunečního záření během těchto dní. Na tuto kapitolu navazuje teoretická analýza možných stavů instalace fotovoltaické části, které jsou podrobně popsány. Zároveň jsou zhodnoceny jejich pozitiva i negativa.

Kapitola sedmá se zabývá posouzením ekonomických aspektů tohoto systému. V této kapitole jsou uvedeny jednotlivé položky investice spojené s hlavním ekonomickým aspektem – návratností investic. Byly vytvořeny různé modelové situace, které se z části zakládají na poznatcích z předchozí kapitoly a z části na teoretické úvaze, která má svůj základ položen v teoretické části této diplomové práce.

Kombinací dvou nestálých obnovitelných zdrojů elektrické energie lze dosáhnout stavu, kde se jednotlivé systémy navzájem doplňují a vytvářejí tak kompaktní celek. S využitím akumulačního systému s vhodnou kapacitou, z něhož bude možno napájet domácí spotřebiče, lze docílit situace, kdy objekt nebude muset být připojen do elektrické sítě regionálního distributora. Případná rezerva může být v podobě záložního generátoru pro případ, kdy nebude dostatek sluneční ani větrné energie pro zachování činnosti spotřebičů s nejvyšší prioritou. Samozřejmostí pro plné využití hybridního systému je nízkoenergetická stavba s těmi nejvyššími standardy úspory energií. Kombinací tohoto systému na vhodném místě společně se zdrojem tepelné energie v podobě například tepelného čerpadla lze dosáhnout úplné nezávislosti objektu od všech inženýrských sítí, které by bylo jinak třeba nákladně vybudovat společně s většinou dlouze trvajících byrokratických postupů, nebo by jejich vybudování nebylo v podstatě ani možné vzhledem ke vzdálenosti objektu.

Hybridní zdroje elektrické energie teprve čekají na svou příležitost u uživatelů, kteří chtějí žít v souladu s přírodou a být nezávislí na okolí. Skýtají v sobě obrovský potenciál, který může být rozvíjen a vylepšován i na mezinárodní úrovni.

9 Seznam zdrojů

Knižní zdroje:

- [6] BOYLE, Godfrey, et al. Renewable energy Power for a sustainable future. Second Edition. Oxford : OUP/The Open University, March 2004. 464 s. ISBN 978-0-19-926178-9.
- [8] BERANOVSKÝ, Jiří; MURTINGER, Karel; TOMĚŠ, Milan. Fotovoltaika - elektřina ze slunce. 3. aktualizované vydání. [s.l.] : EkoWatt, 09/2007. 112 s. ISBN 978-80-87333-01-3.
- [21] HALLENGA, Uwe. Malá větrná elektrárna. Ostrava : HEL, 2006. 144 s. ISBN 80-86167-27-5.
- [20] CROME, H. *Technika využití energie větru*. 1. vydání. Nakladatelství HEL Ostrava, 2002. 144 stran. ISBN 80-86167-19-4.
- [17] Obnovitelné zdroje a skupina ČEZ : Informační brožura. [s.l.] : [s.n.], 2010. 43 s.
- [10] STUHLÝ, Jindřich. *Bakalářská práce: Průzkum trhu - Fotovoltaické systémy*. Hlučín : [s.n.], 2009. 52 s.

Dokumentární zdroje:

- [4] MIŠÁK, Stanislav. Akumulace energie.doc [offline]. Ostrava : [s.n.], 2010 [cit. 2011-02-02].
- [25] MIŠÁK, Stanislav. VUT_Brno prezentace, Analýza provozu větrných elektráren [offline]. Ostrava : [s.n.], 2010 [cit. 2011-02-02].
- [26] Technická specifikace k XZST-180W. Jiangsu Province P.C 221121 : Aide Solar, 2011. 1 s. Dostupné z WWW: <http://www.aidesolar.com/pdf/Mono%20125x125mm_185W-200W.pdf>.
- [14] Praktika z fotovoltaiky [online]. Varnsdorf : [s.n.], 2008 [cit. 2011-02-20]. Dostupné z WWW: <http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/ZE_ke_stazeni/praktika_z_fotovoltaiky.pdf>.
- [24] Studie - Obnovitelné zdroje energie a jejich uplatnění na Šumavě [online]. Sušice : [s.n.], 2009 [cit. 2011-03-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.npsumava.cz/gallery/5/1610-vyuzitiozenasumave.pdf>>.

Webové zdroje:

- [1] SOLARENVI [online]. 2011 [cit. 2011-02-17]. Typy instalací. Dostupné z WWW: <<http://www.solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/typy-instalaci/off-grid/>>.
- [2] BORNAY [online]. 2011 [cit. 2011-02-24]. Installations - off grid. Dostupné z WWW: <<http://www.bornay.com/eolica/en/installations/6>>.
- [3] BORNAY [online]. 2011 [cit. 2011-02-24]. Installations - grid connection. Dostupné z WWW: <<http://www.bornay.com/eolica/en/installations/6/grid-connection/12>>.
- [5] ELEKTROVEGA [online]. 2009 [cit. 2011-02-28]. Image. Dostupné z WWW: <http://elektrovega.cz/image/grafika_panely.gif>.
- [7] SOLARCO [online]. 2011 [cit. 2011-03-19]. Co je to fotovoltaika. Dostupné z WWW: <http://www.solar-co.cz/wp-content/uploads/2011/02/fotovoltaika_nahled-640x250.png>.
- [9] SOLARTEC [online]. 2011 [cit. 2011-03-10]. Nejekologičtější zdroj nevyčerpatelné energie. Dostupné z WWW: <<http://www.solartec.cz/cs/fv-systemy/o-fotovoltaice/nejekologictejsi-zdroj-energie.html>>.
- [11] BECHNÍK, Bronislav. TZB-INFO [online]. 2009 [cit. 2011-03-12]. Historie a perspektivy OZE – fotovoltaika, méně rozšířené technologie - TZB-info. Dostupné z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-mene-rozsirene-technologie>>.
- [12] LI DESSAU, Kathy. SOLAR NOVUS TODAY [online]. 2010 [cit. 2011-03-17]. Learning from Nature: Dye sensitized solar cells. Dostupné z WWW: <http://www.solarnovus.com/index.php?option=com_content&view=article&id=1598:learning-from-nature-dye-sensitized-solar-cells&catid=38:application-tech-features&Itemid=246>
- [13] BECHNÍK, B.; BAŘINKA, R.; ČECH, P. Czech RE Agency [online]. 2009 [cit. 2011-03-04]. Czech RE Agency - Analýza životního cyklu fotovoltaických systémů. Dostupné z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/ziv-cyklus>>.
- [15] S-power, domácí solární elektrárny [online]. 2009 [cit. 2011-03-22]. Volba technologie. Dostupné z WWW: <<http://www.s-power.cz/volba-technologie.html>>.
- [16] VEČEŘA, Martin. ASOLA.CZ [online]. 2011 [cit. 2011-03-24]. Panely na střeche. Dostupné z WWW: <<http://www.asola.cz/?rubrika=2>>.

[18] Wikipedie - otevřená encyklopedie [online]. 2011 [cit. 2011-03-25]. Beaufortova stupnice – Wikipedie. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Beaufortova_stupnice>.

[19] HORČÍK, Jan. Ekologické bydlení [online]. 2010 [cit. 2011-03-26]. První sladkovodní větrná farma v USA v jezeře Erie. Dostupné z WWW: <<http://www.ekobydleni.eu/vetrna-energie/prvni-sladkovodni-vetrna-farma-v-usa-v-jezere-erie>>.

[22] Factinfo [online]. 2011 [cit. 2011-03-011]. Kapitoly. Dostupné z WWW: <<http://www.factinfo.net/category/alternativni-zdroje-energie/159/obnovietlne-zdroje-energie-1-cast>>.

[23] HANSLIAN, David . 4 - construction [online]. 2010 [cit. 2011-03-28]. Potenciál větrné energie v České republice. Dostupné z WWW: <<http://www.4-construction.com/cz/clanek/potencial-vetrne-energie-v-ceske-republice/>>.

[24] Ministerstvo životního prostředí [online]. 2011 [cit. 2011-04-01]. Metodický pokyn - umístování staveb vysokých větrných elektráren. Dostupné z WWW: <[http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodicky_pokyn_umistovani_staveb/\\$FILE/OK_L-Metodika_VVE_p1-20050502.jpg](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodicky_pokyn_umistovani_staveb/$FILE/OK_L-Metodika_VVE_p1-20050502.jpg)>.

Seznam příloh:

Příloha I. – Beaufortova stupnice rychlosti větru

Příloha II. – Parametry větrné elektrárny AP 12

Příloha III. – Parametry fotovoltaického panelu XZST-180W

Příloha IV. – Parametry střídače Windy Boy 5000A

Příloha V. – Parametry střídače Sunny Island 3324

Příloha VI. – Parametry střídače Sunny Boy 2100TL

Příloha VII. – Parametry Sunny WebBox

Příloha VIII. – Parametry baterií OPzS 420